

**SENSOR DE HUMEDAD DEL SUELO TIPO SONDA CON SISTEMA DE
MONITOREO PARA APLICACIONES EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN**

LANDNEYKER BETANCOURTH CASTRO

**UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
VILLAVICENCIO
2016**

**SENSOR DE HUMEDAD DEL SUELO TIPO SONDA CON SISTEMA DE
MONITOREO PARA APLICACIONES EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN**

Landneyker Betancourth Castro

**Trabajo de grado para optar al título de:
Ingeniero Electrónico**

**Director:
M.Cs. Andrés Fernando Jiménez**

**UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA ELECTRÓNICA
VILLAVICENCIO-COLOMBIA
2016**

Nota de Aceptación:

M.Cs. Andrés Fernando Jiménez
Director Trabajo de Grado

M.Cs. Andrés Fernando Jiménez
Jurado

DEDICATORIA

A mi madre.

A mi abuela.

A mi abuelo.

“Ojalá fueran eternos”.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su reconocimiento a:

- En primer medida un agradecimiento muy especial a mi director de trabajo de grado: Andrés Fernando Jiménez López por su acompañamiento, orientación, motivación y paciencia que han sido fundamentales para el desarrollo de esta investigación.
- Un agradecimiento a los profesores de la Universidad de los Llanos y a la comunidad académica por contribuir con sus enseñanzas en nuestra formación profesional.

CONTENIDO

RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN.....	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	17
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	17
1.3. OBJETIVOS.....	18
1.3.1. Objetivo general.....	18
1.3.2. Objetivos Específicos.....	18
1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	18
2. MARCO DE REFERENCIA.....	20
2.1. ESTADO DEL ARTE	20
2.2. MARCO TEÓRICO	27
2.2.1. Características y propiedades del suelo	27
2.2.1.1. Composición de suelos.....	27
2.2.1.2. Características del suelo	28
2.2.1.3. Propiedades físicas.....	28
2.2.1.4. Propiedades químicas	29
2.2.1.5. Propiedades biológicas	29
2.2.1.6. Características eléctricas del suelo	29
2.2.1.7. Clasificación de suelos	30
2.2.1.8. Clasificación aashto.....	31
2.2.1.9. Sistema de clasificación unificada de los suelos	32
2.2.2. Técnicas para la medición de humedad del suelo	32
2.2.2.1. Método para la medición.....	35
2.2.2.1.1. Sensores capacitivos	36
2.2.3. Sensores comerciales.....	38
2.2.3.1. Sensores	38
2.2.3.1.1. Sentek EnviroSCAN Probe	38

2.2.3.1.2.	Diviner 2000	41
2.2.3.1.3.	Drill & Drop	42
2.2.3.1.4.	Sonda ECH2O	43
2.2.3.2.	EL SOFTWARE	44
2.2.3.3.	Datalogger	45
3.	TIPO Y METODO DE INVESTIGACIÓN	47
3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	47
3.2.	METODOLOGÍA	47
4.	METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE SENSORES	48
4.1.	EXTRACCIÓN DE MUESTRA DEL SUELO DE LA UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS	48
4.2.	PORCENTAJE DE HUMEDAD GRAVIMÉTRICA DEL SUELO A PARTIR DE LA CAPACIDAD DE CAMPO MÁXIMA	51
4.3.	LLENADO DE MATERAS PARA LA MEDICIÓN CON SENSORES VH400 (VEGETRONIX): EL SENSOR VH400	57
5.	PRUEBAS Y MEDICIONES PRELIMINARES	66
5.1.	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SENSOR CAPACITIVO PARA LA MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO	66
6.	DISEÑO DEL SENSOR DE HUMEDAD TIPO Sonda	73
6.1.	CONSIDERACIONES DE DISEÑO	73
6.2.	GENERALIDADES DE DISEÑO	76
7.	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO	81
7.1.	MÓDULO BLUETOOTH HC-05	81
7.1.1.	Configuración de módulo Bluetooth HC-05 mediante comandos AT	82
7.1.2.	Creación de la aplicación para el monitoreo de datos con Processing	87
7.2.	COMUNICACIÓN MEDIANTE GPRS SHIELD (ARDUINO):	93
7.2.1.	Configuración del GPRS mediante comandos AT	93
7.3.	ALIMENTACIÓN MEDIANTE SOLAR CHARGER SHIELD	95
8.	FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR TIPO Sonda PARA LA MEDICIÓN DE HUMEDAD	100
8.1.	SENSOR DE HUMEDAD TIPO Sonda	100
8.2.	CIRCUITO PARA LA MEDICIÓN DE HUMEDAD EN EL SUELO	102
8.3.	INTERFAZ PARA EL MONITOREO DE VARIABLES	103

9. RESULTADOS	105
10. DISCUSIÓN	115
11. CONCLUSIONES	117
REFERENCIAS.....	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Triángulo de texturas.	30
Figura 2. Clasificación AASHTO.	31
Figura 3. Tensiómetro para la medición de humedad del suelo.	33
Figura 4. Diagrama principio de funcionamiento de un medidor TDR.	34
Figura 5. Sensor capacitivo para la medición de humedad en el suelo.	36
Figura 6. Puente de impedancias.	37
Figura 7. Sonda EnviroScan.	38
Figura 8. Esquema del funcionamiento de los sensores de la sonda EnviroScan.	39
Figura 9. Sistema portable Diviner2000.	41
Figura 10. Sonda Drill & Drop.	42
Figura 11. Sonda ECH2O.	43
Figura 12. Ilustración de registros en IrriMAX.	44
Figura 13. Registrador de datos (DataLogger).	45
Figura 14. Extracción de la muestra del suelo.	48
Figura 15. Tamiz.	49
Figura 16. Proceso de tamizado.	49
Figura 17. Proceso de secado del suelo.	50
Figura 18. Apariencia de secado del suelo después de 24 horas (izq) y después de 48 horas (der).	51
Figura 19. Peso de la muestra de suelo.	52
Figura 20. Prueba de capacidad de campo máxima del suelo.	52
Figura 21. Muestra de suelo drenado y cápsulas.	53
Figura 22. Muestras de suelo a su máxima capacidad de campo en pequeñas cápsulas.	53
Figura 23. Peso de las muestras en cápsulas.	54
Figura 24. Horno para secado de las muestras.	54

Figura 25. Extracción y peso de la muestra del anillo.	56
Figura 26. Llenado de materas con suelo seco.	57
Figura 27. Pesado de materas con muestras de suelo seco.	57
Figura 28. Vaso de precipitado y probeta.	58
Figura 29. Llenado de materas con diferente cantidad de agua.	59
Figura 30. Sensor de humedad VH400.	59
Figura 31. Ajuste de los sensores de humedad VH400.	60
Figura 32. Sensor de humedad VH400 a 80 mm de profundidad.	60
Figura 33. Medición de voltaje en sensores de humedad VH400.	61
Figura 34. Gráfica de voltaje contra cantidad de agua del sensor de humedad VH400.	62
Figura 35. Curva de comportamiento del sensor VH400.	63
Figura 36. Circuito en modo astable con el temporizador LM555.	66
Figura 37. Esquema del conversor de frecuencia a voltaje LM2907.	67
Figura 38. Señales de salida de los circuitos LM555 (amarilla) y LM2907 (roja).	68
Figura 39. Circuito para la medición de capacitancia del sensor tipo sonda.	68
Figura 40. Prototipos para la medición de humedad del suelo con anillos de acero y cobre.	69
Figura 41. Salidas de los circuitos LM555 (roja) y LM2907 (amarilla) con el sensor en suelo seco.	70
Figura 42. Salidas de los circuitos LM555 (roja) y LM2907 (amarilla) con el sensor en suelo parcialmente húmedo.	70
Figura 43. Salidas de los circuitos LM555 (roja) y LM2907 (amarilla) con el sensor en suelo saturado.	71
Figura 44. Partes del cable coaxial.	74
Figura 45. RG 59 U/PP con cobertura de malla al 90%, 75 Ohm.	74
Figura 46. RG 59 DM (doble malla), con cobertura de malla del 67% al 90%, 75 Ohm.	74
Figura 47. RG 59 U y bipolar de 2x0.50 mm, con cobertura de malla al 90% con el bipolar integrado al coaxial para conducir energía de 12 a 24 voltios, 75 Ohm.	74

Figura 48. RG 58 con conductor multifilar.	75
Figura 49. RG 58 FOAM, con conductor de cobre macizo y dieléctrico de polietileno expandido por el método de inyección gaseosa, 50 Ohm.	75
Figura 50. RG 213 FOAM, con conductor central de cobre macizo y dieléctrico de polietileno expandido por inyección gaseosa.	75
Figura 51. RG 174 A/U con cobertura de malla, 50 Ohm.	75
Figura 52. Aislación electrónica.	76
Figura 53. Diseño final del sensor de humedad tipo sonda (izquierda) y tubo PVC de acceso (derecha).	77
Figura 54. Esquemático de un circuito oscilador RLC acoplado a un elemento capacitivo (Cs), en contacto con el suelo.	80
Figura 55. Módulo Bluetooth HC-05.	82
Figura 56. Conexión módulo Bluetooth con Arduino UNO.	83
Figura 57. Configuración Para iniciar el Bluetooth por medio de comandos AT.	83
Figura 58. Hiperterminal de Arduino UNO.	84
Figura 59. Respuesta del Bluetooth.	84
Figura 60. Código fuente para la transmisión de mensajes (datos) vía Bluetooth.	86
Figura 61. Recepción de datos del Bluetooth a través de dispositivo móvil.	86
Figura 62. Software Processing para el desarrollo de la aplicación Bluetooth.	87
Figura 63. Importación de la librería Ketai (Ketai Library).	88
Figura 64. Configuración para la activación de Bluetooth y recepción de datos.	89
Figura 65. Función principal para la visualización de la aplicación.	90
Figura 66. Función principal del programa.	91
Figura 67. Asignación de dirección física (MAC) para la conexión Bluetooth – móvil.	91
Figura 68. Interfaz para el monitoreo de variables.	92
Figura 69. GPRS Shield.	93
Figura 70. Configuración del puerto serial (Rx-Tx) a 19200 baudios,	94
Figura 71. Configuración del GPRS para envío de mensajes de texto.	94

Figura 72. Configuración del GPRS para llamadas de voz.	95
Figura 73. Switch Case para llamar las funciones mediante caracteres.	95
Figura 74. Solar Charger Shield (cargador solar) para la alimentación del sistema.	96
Figura 75. Especificaciones Solar Charger Shield.	97
Figura 76. Panel solar 9V.	97
Figura 77. Conexión del Solar Charger Shield con Arduino UNO.	98
Figura 78. Conexión del Solar Charger Shield con indicadores led (cargando CH y cargado OK).	98
Figura 79. Sistema de carga autónomo con los dispositivos Solar Charger Shield, Arduino UNO, y panel solar de 9V.	99
Figura 80. Diagrama de bloques del sistema.	100
Figura 81. Esquemático de sonda de capacitancia en tubo de acceso, ilustrando los dos electrodos cilíndricos, el campo marginal (fringing field) que entra en el suelo está fuera del tubo de acceso y el campo electromagnético principal que se encuentra directamente entre los dos electrodos.	101
Figura 82. Sensores de humedad tipo sonda introducidos en suelo húmedo.	102
Figura 83. Solicitud de permiso para activar Bluetooth.	103
Figura 84. Visualización de la aplicación.	103
Figura 85. Confirmación para enviar del mensaje de texto.	104
Figura 86. Mensaje de texto enviado.	104
Figura 87. Apariencia de secado del suelo después de 48 horas.	105
Figura 88. Llenado y pesado de materas con suelo seco.	106
Figura 89. Curva de respuesta de los sensores en función del porcentaje de humedad volumétrica.	109
Figura 90. Línea de tendencia y cálculo de la ecuación y el coeficiente de determinación.	110
Figura 91. Elementos necesarios para la caracterización del sensor.	111
Figura 92. Medición de humedad con el sensor y el sistema implementados.	111
Figura 93. Resultado del circuito PCB y visualización en 3D.	112
Figura 94. Sistema para la medición de humedad, transmisión y monitoreo de	113

información.

Figura 95. Instalación del sensor de humedad tipo sonda. 113

Figura 96. Sistema de adquisición de datos y alimentación mediante panel solar. 114

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cálculo de humedad gravimétrica del suelo. Peso del suelo: 1Kg.....	54
Tabla 2. Datos para el cálculo de densidad aparente del suelo.....	55
Tabla 3. Materas con porcentaje de agua según su masa.....	56
Tabla 4. Medición de los sensores de voltaje en las muestras de suelo.....	57
Tabla 5. Ecuación de VWC para diferentes rangos de voltaje.....	62
Tabla 6. Datos de los sensores en voltaje y VWC.....	63
Tabla 7. Calculo de humedad gravimétrica y volumétrica de las muestras secas.....	63
Tabla 8. Cantidad de agua y porcentaje equivalente según la masa del suelo.....	105
Tabla 9. Respuesta del sensor en función del porcentaje de humedad del suelo.....	106
Tabla 10. Cálculo de la densidad aparente del suelo.....	107
Tabla 11. Cálculo de la humedad gravimétrica (Hg) y volumétrica (Hv) del suelo.....	107
Tabla 12. Respuesta de los sensores (V) en relación al porcentaje de humedad volumétrica.....	108

RESUMEN

La medida de los sensores de humedad de suelo en cultivos agrícolas es fundamental para los sistemas de irrigación, debido a que permiten definir la cantidad de agua que se está introduciendo al suelo y además evitar su desperdicio. En este documento se dan a conocer los resultados del desarrollo de un sistema de sensado de humedad de suelo para varias profundidades, que permite definir cantidad de agua disponible en el suelo y el momento en que el suministro debe terminar; debido a que las condiciones establecen que el agua se está perdiendo por infiltración. Es un dispositivo de gran utilidad en el manejo del recurso hídrico de cultivos agrícolas y que se compone de: un sistema de sensado, un sistema de visualización en campo, un módulo de procesamiento mediante un dispositivo embebido, un sistema de alimentación por energía solar y un módulo de transmisión de información vía GPRS (mensajería de texto) a un servidor. Los datos recibidos son visualizados mediante tablas de datos y gráficos en un dispositivo móvil.

Palabras Clave: Agricultura de Precisión; Humedad de Suelo; Permitividad; Irrigación; Sensor.

INTRODUCCIÓN

En este proyecto se propone diseñar un sensor tipo sonda para la medición de humedad del suelo con un sistema de adquisición y transmisión de datos inalámbrico vía Bluetooth y un GPRS para enviar mensajes de texto (SMS) con la información obtenida, que permitirá el monitoreo remoto de cultivos, con un suministro confiable de energía. Se espera que sea posible usar el dispositivo de forma sencilla y eficaz.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El suelo es una parte fundamental de la agricultura. Gracias a este se pueden obtener diferentes materias primas fundamentales para el sustento del ser humano. Debido a las condiciones ambientales de su lugar de ubicación, los suelos están expuestos a diferentes factores que afectan su estructura y buen desempeño.

Actualmente existen diversos tipos de sensores creados con la finalidad de la medición de humedad del suelo [1], los cuales utilizan diferentes principios aunque tienen la misma finalidad. Debido a que estos sistemas son tan costosos y que no es posible acceder a ellos de forma sencilla, es necesario estudiar una forma de construir un sensor de humedad al alcance de un agricultor promedio.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Este proyecto desarrolla un sistema que permite la medición de la humedad del suelo en diferentes profundidades, el cual está compuesto por tres etapas principales: el sensor de humedad tipo sonda, la interfaz de usuario, la comunicación para el monitoreo de variables, además de un sistema de energía autónomo. El sensor de humedad tipo sonda diseñado, está basado en un estudio hecho acerca de modelos existentes y técnicas para la medida de humedad de suelos. La interfaz de usuario está creada en el software Processing, cuyo entorno de desarrollo permite la producción de proyectos multimedia. La comunicación Bluetooth, para la transmisión de información del sensor a un dispositivo móvil y por último, el sistema de energía autónomo que permite tener una fuente de alimentación para la carga de baterías LiPo por medio de un panel solar.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Diseñar, implementar un sensor tipo sonda para la medición de humedad del suelo con sistema de monitoreo.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un sensor de humedad de suelo tipo sonda con diferentes niveles de medición y visualización de información mediante dispositivos móviles.
- Diseñar e implementar un sistema de telemetría que permita enviar los datos adquiridos a dispositivos remotos (móviles) para la visualización y el monitoreo de la información.
- Diseñar e implementar una interfaz gráfica de adquisición, seguimiento y visualización de información de forma local y remota.

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La medición de la humedad del suelo de forma precisa y distribuida en procesos agrícolas es necesaria para mejorar la eficiencia del uso del agua en riegos y el cuidado del suelo, ya que cada cultivo o plantación requiere mantener unos rangos específicos en cuanto a las variables del entorno.

La humedad, más que un factor que aqueja el suelo, es indispensable para la correcta conservación y fertilidad del mismo. Tradicionalmente la decisión de regar o no el cultivo se da por decisión autónoma del agricultor, lo que podría tener un alto grado de error, para esto se pretende diseñar un sistema que facilite y dé una clara noción del estado del cultivo, para de esta manera tener un proceso más óptimo [2].

Para optimizar el consumo de agua y conseguir mejores resultados los sensores de humedad se distribuyen en el campo ya sea espacialmente con varios sensores o verticalmente para analizar el terreno en cuanto a profundidad con diferentes medidas, el proyecto busca desarrollar éste último método implementando un sistema de adquisición de datos para el monitoreo y supervisión del estado del suelo y el control de riegos [3].

La Universidad de los Llanos cuenta con un amplio estudio en lo que a agricultura se refiere. A pesar de que tiene una gran infraestructura para el trabajo agrícola, y una amplia maquinaria para este proceso, tiene muchas falencias en cuanto a temas de automatización. Debido a estas falencias, es necesario diseñar un dispositivo que permita optimizar el uso del agua en los cultivos con el fin de minimizar el impacto ambiental del mismo y maximizar las ganancias del propietario del cultivo. Se espera que el prototipo que se quiere desarrollar permita monitorear la humedad de suelo en un cultivo, desde un dispositivo móvil o a distancia mediante el uso de la web.

2. MARCO DE REFERENCIA

En este capítulo se presentan los antecedentes relacionados con el sistema propuesto, diseños a fines con el fin de determinar conocimientos y procedimientos para la elaboración del proyecto, así como también el marco teórico que brinda el estudio de los conceptos del suelo, que se vuelve indispensable para una cabal comprensión de la técnica a usar en el sensor y las dificultades en aplicar la misma, breves explicaciones respecto a la teoría detrás del método capacitivo y de TDR para la medida de la humedad de suelos y algunos tipos de sensores comerciales.

2.1. ESTADO DEL ARTE

Otros autores han realizado o intentado construir distintos modelos de sensores con el propósito de medir la humedad del suelo, los cuales utilizan diferentes principios aunque tienen la misma finalidad. El desarrollo de estos sensores es un tema de gran complejidad y cuyo estudio hoy en día aún está en progreso, resumimos la información recopilada de diversos artículos, trabajos de grado y “papers” publicados, que fueron estudiados en el transcurso del proyecto. De este resumen se pueden obtener valiosos aportes en el plano teórico, así como consideraciones que pueden ayudar a entender anomalías en las medidas realizadas.

Uno de los trabajos realizados referentes, en el año 2009 en la universidad de la República de Uruguay, titulado “*Sensor de Humedad de Suelos*” por los estudiantes Claudia Guastavino, Federico Jorge e Ismael Schinca, realizó una primera aproximación a la medida de la humedad del suelo mediante técnicas electrónicas, con el objetivo de integrar estos sensores en sistemas de monitoreo remoto. A partir del estudio de las distintas técnicas para la medida de humedad de suelos, se diseñó y caracterizó un sensor utilizando la técnica que se consideró más adecuada. Para evaluar el diseño realizado se verificó la consistencia de las medidas del mismo en distintos tipos de suelo, comparando los valores obtenidos con los de un sensor comercial con el mismo principio de funcionamiento. Los resultados obtenidos fueron consistentes demostrando la viabilidad de la técnica

elegida para la construcción de un sensor de bajo consumo y bajo costo. Se adaptó el hardware necesario y se realizó un software que permitiera la integración del sensor a una red de sensores inalámbricos a partir de su operación desde un dispositivo nodo de esta red llamado Mote, trabajando en TinyOS. [4]

En el año 2004, en Argentina se publicó el artículo *“Sensor de Humedad Conductivo en Sólidos con Aplicación en Invernaderos”* realizado por el estudiante de la Universidad Nacional de Quilmes, Elias Fliger y el ingeniero Leonardo Padovani, que consistía en el diseño y construcción de un sensor de humedad conductivo en sólidos implementado en un invernadero, que regulara desde un Controlador Lógico Programable (PLC) el porcentaje de humedad en suelos, adoptando el método conductivo, consistente en hacer pasar una corriente a través de unos electrodos en contacto con la tierra. [5]

En el Departamento de Geografía de la Universidad de Salamanca se realizó el *“Diseño y Validación de una Sonda TDR para la Medición de la Humedad del Suelo”* a cargo de los estudiantes Martínez Fernández y Ceballos Barbancho, el trabajo describe el diseño de una sonda para medir la humedad del suelo mediante la técnica TDR (Time Domain Reflectometry). El modelo propuesto presenta una serie de ventajas sobre otros anteriores y se caracteriza, entre otras cosas, por su versatilidad, fácil montaje y conexión, robustez, estanqueidad, nitidez de la señal y bajo coste económico. Se ha llevado a cabo un exhaustivo análisis de validación, comparando series de mediciones de humedad medida con TDR y gravimétricamente en monolitos de suelos con diferentes características, obteniendo en todos los casos un resultado satisfactorio. [6]

En la revista de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, se presentó el trabajo *“Sistema Inalámbrico de Monitorización para Cultivos en Invernadero”* en el año 2014, que presenta un sistema avanzado para la monitorización de variables aplicadas a la agricultura intensiva. El sistema usa una red de sensores inalámbricos (WSN) que funciona con 6LoWPAN y RPL como el protocolo de enrutamiento, mide humedad, temperatura, luz y el contenido volumétrico de agua en el suelo. La WSN envía los datos recolectados a un dispositivo embebido que almacena la información en una base de datos a fin de visualizar de forma gráfica y en tiempo real los valores obtenidos en los cultivos. El sistema desarrollado permite una gran flexibilidad de instalación y de adaptación a cualquier invernadero, ya que se basa en tecnología inalámbrica, que los nodos pueden establecer las rutas de los enlaces entre ellos automáticamente, y tienen implementada una función de ahorro de energía que le permite alargar la vida útil de las baterías lo suficiente para una campaña agrícola sin necesidad de mantenimiento. [7]

Otro equipo de estudiantes, Aristizabal Botero y Jorge Alirio, realizaron la tesis *“Utilización de Sensores de Humedad del Suelo en la Implementación de Modelos Climáticos en Zonas de Montaña Mediterránea”* en la Universidad Nacional de Colombia, en el año 2014, que presenta la utilización de sensores de humedad del suelo en la implementación de los modelos climáticos ECHAM5 MPI y GFDL M2-1 para la predicción de la respuesta de la humedad del suelo frente a los escenarios de cambio climático A1B, A2 y B1 en la cuenca de la Ribera Salada (España), para los periodos 2046-2065 y 2081-2100. [8]

Siguiendo con la búsqueda, se encuentran diversos documentos en diferentes idiomas relacionados con el estudio y desarrollo de sensores, entre ellos el artículo *“A NEW 1.4-GHZ SOIL MOISTURE SENSOR”* desarrollado en la Universidad Ferdowsi de Mashhad, publicado en la revista Measurement en el año 2012, por Masoud Rezaei, Emad Ebrahimi, Sasan Naseh y Mehdi Mohajerpour, que presentan un nuevo sensor de humedad del suelo de 1,4 GHz utilizando la línea de transmisión de microcinta. El sensor propuesto consta de dos partes: La primera, la cabeza del sensor, que es una línea de transmisión “microstrip” para ser colocado en el suelo, y la segunda parte, un transceptor electrónico que envía una onda sinusoidal en la cabeza del sensor en un extremo de la línea de transmisión, y recibe la onda desde el otro extremo. Transmisor es básicamente un oscilador de “Colpitts”, y el receptor es un detector de fase que mide el desplazamiento de fase debido a la variación de la velocidad causada por el contenido de humedad del suelo. El sensor propuesto es implementado y probado en una muestra de suelo típico. Las principales ventajas de este sensor son su alta precisión, rapidez de medición, su bajo coste y facilidad de implementación. Dado que el sensor tiene bajo consumo de energía y que puede ser recomendado para aplicaciones de baja potencia, tales como redes de sensores inalámbricos. [9]

En India, en la Escuela universitaria CDAC Mohali, publicaron en diciembre de 2014 *“DESIGN AND DEVELOPMENT OF SOIL MOISTURE SENSOR AND RESPONSE MONITORING SYSTEM”* trabajo dirigido por D.K. Jain, que tiene como objetivo la realización de un sensor de humedad del suelo, elaborando las sondas del sensor de níquel, que es un material anti-corrosivo y robusto para su uso en aplicaciones relacionadas con la agricultura. Cuenta con un sistema de monitoreo de respuesta que mide la humedad del suelo, la compara con los valores deseados dados por el usuario y genera una alerta en caso de que el valor de la humedad del suelo esté por debajo del deseado. Esto ayuda en problemas relacionados con el crecimiento de los cultivos en los que se requiere el riego a intervalos irregulares. También es útil en el control de la humedad del suelo en campos de golf. [10]

Otro equipo de investigadores en India, realizaron un trabajo más reciente publicado en la revista *Sensors and Actuators A: Physical* en 2015 denominado “*A low-power, low-cost soil-moisture sensor using dual-probe heat-pulse technique*”, este artículo presenta el desarrollo y prueba de un sensor de humedad del suelo de doble sonda de calor de impulsos (DPHP) de bajo consumo y bajo costo. El sensor DPHP tiene dos sondas: un calentador y una sonda de sensor de temperatura separada 3mm de la sonda de calor. El calentador de bobina es alimentado con 3,3V, tiene una resistencia de 33 ohmios y 330 mW, que se encuentra entre los más bajos de esta categoría de sensores. La sonda de calor es de 40 mm de largo con 2 mm de diámetro y por lo tanto es lo suficientemente rígida para ser insertada en el suelo. El sensor se aprobó con arcilla blanca y se prueba con muestras de suelo de color rojo para detectar el contenido volumétrico de agua que van desde 0% a 30%. El sensor está integrado con amplificadores de baja potencia para la salida de la termocupla y usa la plataforma TelosB mote para la comunicación inalámbrica. Una batería de iones de litio de 3,7 V con una capacidad de 1150 mAh se utiliza para alimentar el sistema. La batería se carga con 6V y 300mA de un conjunto de celdas solares. El tiempo de vida del nodo sensor DPHP es alrededor de 3,6 días. El sensor fue probado en dos laboratorios independientes para la validación. La diferencia en las lecturas mientras se repetían los experimentos fue de menos de 0,01%. Además, el efecto de la temperatura ambiente en la medición de la humedad del suelo se estudió experimentalmente y computacionalmente. [11]

En la Escuela Técnica Superior de Mosul, Irak, Diaa Mehdi Faris y Mahmood Basil Mahmood, presentaron “*Data Acquisition of Greenhouse Using Arduino*”. En este trabajo, el diseño se ha dirigido a la adquisición de datos en invernadero para múltiples sensores utilizando los datos de la simulación o procesamiento para lograr la mejora del crecimiento en invernadero, estos datos tienen efecto sobre el clima de este. Se han utilizado Interfaces gráficas de usuario (GUI) a través de LabVIEW y el firmware de Arduino como software y la placa Arduino y sensores como hardware. El uso de la placa Arduino Mega ofrece múltiples entradas análogas y E/S digitales, para leer fácilmente los datos de temperatura, humedad, gas CO₂, también la medición de la humedad del suelo que necesita para las plantas de riego y la intensidad de las luces que se aplicaron para el invernadero. Estos factores tienen mayor efecto sobre las plantas en crecimiento. El seguimiento de los diferentes cambios en los parámetros de los ambientes de efecto invernadero y la capacidad de controlar el clima, son los propósitos de este sistema. [12]

Todd Watson, Daniel Holstin, Fred Johansen, Troy Stokes, George Vargo, y Vic Verbinski, del Campus Point Court, San Diego, CA, publicaron “*Results Of Modeling And Experimental Measurements For The Design Of A Neutron Surface Moisture Measurement Sensor*” el trabajo aborda el estudio de los resultados de

mediciones experimentales y modeladas para el diseño de un sensor de medida de humedad de neutrones. Los resultados indican que este sensor debe ser capaz de proporcionar información sobre el perfil de concentración de humedad en los primeros 15 cm de material. Las pruebas muestran que el sensor debe ser capaz de operar en los campos del tipo de alta temperatura y exposición a radiación gamma, que se espera dentro de los tanques de Hanford del sitio. Un sensor de campo y un sistema de despliegue dentro del tanque se fabricaron para la aplicación de esta tecnología a los patios de tanques de Hanford. [13]

“Analysis of Multilayered Microstrip and Its Application for Designing Microstrip Moisture Sensor” presenta un enfoque unificado para el análisis de la “microstrip” blindada con dieléctricos de varias capas, utilizando una técnica en el dominio de la transformada de Fourier. Los análisis implican el cálculo de la constante dieléctrica efectiva, la impedancia característica y la pérdida dieléctrica de este sistema.

La aplicación de este enfoque para el desarrollo del sensor de humedad de microcinta es presentada. Un procedimiento general para la determinación rigurosa de la función de potencial utilizando el enfoque de matriz de transferencia se ha desarrollado. Resultados teóricos de Interés se obtienen a partir del análisis, donde la constante dieléctrica efectiva, la impedancia característica y la pérdida dieléctrica del sensor se efectúan drásticamente por el espesor de la capa de cobertura. Finalmente se resaltan unos resultados de la ejecución de este sensor. Este trabajo fue desarrollado en el Departamento de Física de la Universidad Putra de Malaysia a cargo de los estudiantes Kaida bin Khalid y Abdul Halim Shaari en el año 2000 [14].

En la Universidad Tecnológica de Shenyang, China, Yang Yu y Weiguang Liu desarrollaron un sensor para la medición de humedad en línea y publicaron: *“Optimum Design of Conducting Sensor for On-line Moisture Measurement”* Este sensor plano de superficie es ideal para la medición en línea de la humedad en material granular debido a su buena repetibilidad. La combinación del método de diseño de regresión ortogonal con el método de elementos finitos de campo de corriente constante se utilizó para modelar el sensor de conducción óptima, con el fin de que la precisión de las mediciones de humedad en línea fuera mejorada. La sensibilidad del sensor fue máxima cuando el espesor varía, el error relativo cumplía con los requisitos. El modelo de dos dimensiones del sensor de conducción se establece y se deciden tres parámetros de dimensiones en base a un diseño óptimo. El sensor de conducción óptimo se utilizó para medir en línea una mezcla húmeda sinterizada y los resultados del experimento muestran su alta precisión. [15]

El equipo de investigadores de la Universidad Putra de Malaysia: Fariba Jafari, Kaida Khalid, Daud.M.Yusoff, y Jumiah Hassan, continuaron con el desarrollo del

sensor de humedad de microcinta en *“Development and Design of Microstrip Moisture Sensor for Rice Grain”* con este trabajo se abordan el análisis y diseño del sensor de microcinta para la determinación exacta del contenido de humedad (MC) en los granos de arroz. El sensor consta de cuatro capas, el sustrato duroid, la capa protectora, área de detección, y de aire. Una relación funcional se ha desarrollado entre la atenuación de microondas del sensor y el contenido de humedad en los granos en las capas de la estructura de la microcinta y se ha encontrado una estrecha concordancia entre los resultados calculados y experimentales. El análisis de la propagación de ondas electromagnéticas en la estructura del sensor simplemente representa y predice las propiedades dieléctricas de los granos de arroz dado por un modelo de mezcla dieléctrica. Este trabajo también estudia el efecto de espesores de la capa protectora sobre la sensibilidad del sensor. El sensor es adecuado para el desarrollo como un instrumento completo y para estimar el contenido de humedad óptimo de granos de arroz, más rápido y preciso. [16]

Mahta Moghaddam, Dara Entekhabi, Yuriy Goykhman, Ke Li, Mingyan Liu, Aditya Mahajan, Ashutosh Nayyar, David Shuman y Demosthenis Teneketzis. Centrarón su atención en sensores inteligentes, en el 2010 con su trabajo *“A Wireless Soil Moisture Smart Sensor Web Using Physics-Based Optimal Control: Concept and Initial Demonstrations”* Este trabajo presenta un nuevo concepto hacia una inteligente tecnología de sensores de red inalámbrica para mediciones óptimas de humedad del suelo en superficies profundas utilizando sensores en el lugar. El objetivo de la tecnología, con el apoyo del programa de Ciencias de la Tierra de la NASA, es permitir que una estrategia de muestreo guiada y adaptativa para la red de sensores, para cumplir con los objetivos de la validación de medición de los sensores de humedad del suelo a bordo de vehículos espaciales. Una aplicación potencial de esta tecnología es la validación de los productos de la misión activa/pasiva de humedad del suelo (SMAP). Espacialmente, la variabilidad total en los campos de la humedad del suelo viene de la variabilidad en los procesos en diversas escalas. Temporalmente, la variabilidad es causada por fuerzas externas, la heterogeneidad del paisaje y antecedentes. La instalación de una densa red “in-situ” para muestrear el campo continuamente en el tiempo para todos los rangos de variabilidad es poco práctico. Sin embargo, una red más escasa, pero más inteligente, con un horario de medición optimizado puede proporcionar las estimaciones de validación operando de una manera guiada con la orientación de sus propias mediciones escasas. La retroalimentación y el control se llevan a cabo en el contexto de la física hidrológica dinámica y el sensor basado en un sistema de modelado. El diseño general de la web de sensor inteligente, incluyendo la arquitectura de control, modelos hidrológicos y sensor basado en la física y elementos de actuación y comunicación, se presenta en este documento. También presentan resultados que ilustran la programación del sensor y estrategias de estimación, así como demostraciones numéricas y concepto de sensor web. [17]

En Bochum, Alemania, en la Universidad de Ruhr, Bianca Will, Michael Gerding, Thomas Musch e Ilona Rolfes, trataron un nuevo diseño de sensores para la caracterización de la humedad del suelo usando mediciones de transmisión de dominio de tiempo (TDT) en su proyecto *“Determination of Soil Moisture Based on an Improved Sensor Design Using Time Domain Transmission Measurements”*. Emplearon la base de la técnica de TDT avanzada, un nuevo concepto de guía de ondas, que ofrece la posibilidad de realizar mediciones de transmisión en los suelos. Por lo tanto múltiples reflexiones a lo largo de la guía de ondas no influyen en la precisión de la medición. Mediante el uso de una de las llamadas mediciones TDT, se puede realizar sin un puerto de medición en el extremo del sensor. Esta contribución se trata de un diseño de sensor mejorado, que permite mediciones de TDT en suelos sin la necesidad de un segundo puerto de medición en el extremo del sensor. Por lo tanto, se desarrolló un "acoplador de reversión concéntrica" que consiste en líneas coaxiales concéntricas. Además, un diseño de un sensor compacto se realiza con respecto a la aplicación en las perforaciones con un diámetro de un par de centímetros. De acuerdo con el creciente interés en las mediciones de humedad del suelo con resolución espacial, este sensor permite la posibilidad de realizar mediciones de TDT con resolución espacial también. Debido a su diseño compacto, el sensor TDT se puede desplazar en el interior del material de interés, lo que permite posiciones de medición arbitrarias. Por lo tanto las mediciones dentro de materiales en capas se pueden realizar, así como las mediciones de las variaciones de permitividad lisas. [18]

En el año 2012, *“A Capacitive Fringing Field Sensor Design for Moisture Measurement Based on Printed Circuit Board Technology”*, es un trabajo realizado por Robert Neal Dean, Aditi Rane, Michael Baginski, Jonathan Richard, Zane Hartzog, y David Elton, que describe el diseño y elaboración de un sensor capacitivo. Los sensores capacitivos de campo con borde de electrodos interdigitados se han utilizado en numerosas aplicaciones. Aunque se utilizan varias tecnologías para realizar estos tipos de sensores, la tecnología de placa de circuito impreso es particularmente ventajosa para la realización de este tipo de sensor a través de la fabricación de las estructuras de electrodos interdigitados estampados en la lámina de cobre. Además, la capa de máscara de soldadura puede aislar los electrodos para evitar cortocircuitos en presencia de agua. Con este enfoque, sensores prototipo fueron diseñados, simulados, fabricados y evaluados correctamente. Las aplicaciones incluyen la detección de agua y medición de la cantidad y contenido de humedad del suelo. [19]

Como punto final de este apartado, se revisó el documento *“Design and Calibration of the Unilateral Sensitive Soil Moisture Sensor”* publicado en 2015 por Kun Xu, Qingyuan Sheng, Xiliang Zhang, Pingping Li y Shutian Chen de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Jiangsu, Zhenjiang, China.

En este trabajo, se presentó un sensor capacitivo sensible unilateral de humedad del suelo, basándose en la estructura de sonda de sensor ECH2O mejorada. A través de la simulación entre la relación de espacio de la placa y el ancho de la placa y la sonda de sensibilidad, profundidad sensible, respectivamente, el tamaño del sensor se determinó con ANSYS primero. Circuito de medición de capacidad basado en el principio de resonancia fue diseñado. La relación entre la salida del sensor y el modelo de calibración del contenido de agua del suelo (β modelo de parámetros), se investigó. Como resultado de ello, propusieron un método de calibración β de dos pasos. Los resultados experimentales mostraron que el modelo de parámetro β describe adecuadamente la relación entre la salida y el contenido de agua del suelo, el coeficiente de correlación mínimo $R^2 = 0,9554$ en el suelo, turba, perlita, y el residuo de vinagre. [20]

Con esto se termina la búsqueda de algunos proyectos, tesis, artículos y ponencias relacionados con sensores para la medición de humedad que han sido desarrollados alrededor del mundo.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Características y propiedades del suelo

Este capítulo realiza una primera instancia del estudio en detalle del tema, partiendo desde las bases de la composición del suelo, aclarando los conceptos de los valores que se pretenden medir y un primer acercamiento a la medida de los mismos

2.2.1.1. Composición de suelos

La naturaleza y composición de un suelo depende del clima (cantidad y tipo de precipitaciones, variaciones de temperatura), de las características de la roca madre que les da origen, del tipo de organismos que se desarrollan en ellas, y del tiempo transcurrido desde que empezó su proceso de formación. Sus componentes gaseosos son básicamente O, N, CO y el agua que contienen puede ser higroscópica, capilar o freática, de acuerdo con los casos y tipos de suelos.

2.2.1.2. Características del suelo

Son los rasgos que marcan la diferencia entre un suelo y otro. Aspectos como el color y la profundidad pueden definirse a simple vista, sin embargo otras se marcan con ensayos o procesos de laboratorio. El estudio de suelos se ha clasificado según sus características físicas, químicas o biológicas.

2.2.1.3. Propiedades físicas

Color: los suelos en su mayoría son de color oscuro, pero a medida que se profundiza se aclara. Cuando son de color oscuro es porque cuentan con mayor cantidad de materia orgánica. Si su textura es de tonalidades rojizas, pardas o amarillentas, quiere decir que poseen una ventilación mayor y no se encharcan. Por su parte los que se encharcan son de colores grises y manchados de verde azulado.

Estructura: los terrones son los que fijan la estructura de acuerdo a cómo estén las partículas en el suelo. Si se encuentran unidas como láminas o lascas son de estructura laminar, pero si están conformando columnas y tienen los bordes redondeados se clasifica como de estructura columnar. Si las columnas cuentan con bordes angulosos es prismática o se les dice blocosa si se unen en forma de bloque.

Porosidad: se determina por las cavidades o poros que permiten la penetración de agua y aire. En las arenas los dos elementos ingresan con facilidad.

Permeabilidad: es la habilidad con que el agua y el aire se movilizan en el suelo. Cuando un suelo se encharca es porque tiene permeabilidad muy lenta.

Profundidad del suelo: la estratificación del suelo ocurre naturalmente como consecuencia del modo en que se depositan las partículas. El volumen total de suelo disponible para almacenamiento de agua y para el crecimiento de raíces puede verse disminuido por esta estratificación. Un suelo superficial, con una capa por ej. De rocas cercanas a la superficie, dispondrá de menor capacidad disponible que un suelo más profundo, por más que su textura sea más fina.

Drenaje: es la evacuación de agua de un suelo que puede causarse por un aguacero o una inundación. El drenaje interno es la rapidez con que el agua se mueve dentro del suelo. En los suelos arcillosos o gredosos, el agua se mueve muy lentamente. Por eso se encharcan y el drenaje externo es la rapidez con que el agua se escurre por la superficie del terreno. Cuando en un aguacero el agua no penetra en el suelo, o lo hace lentamente.

2.2.1.4. Propiedades químicas

Son características del suelo que describen el comportamiento de los elementos, sustancias y componentes que lo integran como materia orgánica, nutrientes y también algunas sustancias que lo perjudican.

Acidez: es una propiedad química que se mide en la solución del suelo por el contenido de Hidrógeno. Si el hidrógeno está en baja cantidad la acidez es moderada o no existe; pero en alta proporción hace que el suelo sea extremadamente ácido. La acidez de un suelo la puede determinar el tipo de roca en el que se origina, puede ser también causada por muchas lluvias que lo lavan, también por un período de evolución muy largo o por alta presencia de residuos vegetales y animales en descomposición.

Capacidad de intercambio de elementos: es una propiedad favorecida por la presencia de arcillas y de humus, que consiste en la capacidad y facilidad que tiene el suelo para retener nutrientes en sus partículas y cederlos a los individuos vegetales cuando los necesitan.

2.2.1.5. Propiedades biológicas

Son características que se presentan en el suelo por la actividad de organismos vivos como animales y plantas dentro y sobre él.

Aireación e Infiltración: debido a que los organismos construyen cuevas y canales por donde pueden pasar el agua y el oxígeno.

Estructura: los diversos materiales y sustancias generados por la descomposición de residuos y por los organismos ayudan a pegar los terrones del suelo.

Fertilidad: la fertilidad aumenta porque al descomponerse los residuos presentes en el suelo se producen nutrientes para las plantas.

2.2.1.6. Características eléctricas del suelo

El suelo es una compleja mezcla de componentes sólidos, líquidos y gaseosos. Los distintos tipos de suelo tienen grandes variaciones en sus niveles de salinidad, tamaño de partículas, forma y composición, materia orgánica y porosidad.

Propiedad dieléctrica: es la principal característica de interés para el trabajo de nuestro proyecto. Al medir una capacidad del suelo, se puede relacionar esta capacidad con una constante dieléctrica y a partir de ésta aplicar un modelo para estimar la humedad del suelo. Cómo es posible esto y que complicaciones tiene implica un análisis profundo de todas las magnitudes eléctricas que entran en juego al utilizar el suelo como dieléctrico.

2.2.1.7. Clasificación de suelos

Los sistemas de clasificación facilitan un lenguaje común para expresar características del suelo, que son infinitamente variables, sin presentar una descripción detallada. Muchos de los sistemas de clasificación de suelos fueron diseñados por ingenieros para sus usos y son basados en propiedades como la distribución del tamaño de grano y la plasticidad.

Clasificación textural: la textura de un suelo se refiere a su apariencia superficial, la cual es determinada por el tamaño de los granos presentes en él: grava, arena, limo y arcilla.

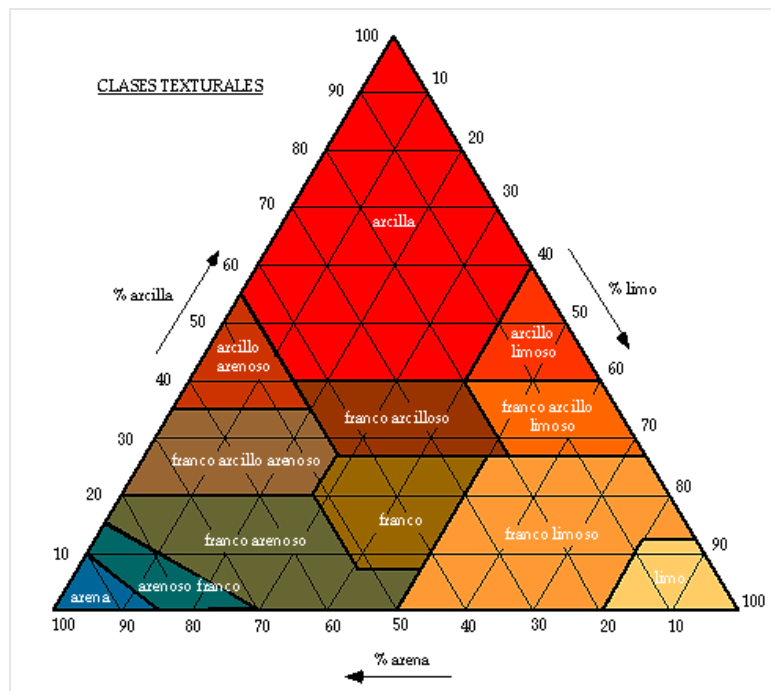


Figura 1. Triángulo de texturas.

Fuente: UNAD

2.2.1.8. Clasificación aashto

(Se desarrolló en 1929 por la Asociación Americana de Carreteras Estatales y Transportes Oficiales). La forma para clasificar el suelo según su textura fue desarrollada por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos, USDA (por sus siglas en inglés). Con la proporción de arenas, limos y arcillas presentes en una muestra de suelo, se llega a un diagrama triangular que está dividido y marcado por áreas, se determina a cual corresponde y se indica el nombre que la clasificación recomienda.

La clasificación se realiza basada en el tamaño del grano y en la plasticidad, de acuerdo a este sistema el suelo es clasificado en siete grupos principales: desde A-1 hasta A-7. Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son grueso granulares. Y los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 son suelos finos o materiales limosos y arcillosos.

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)							Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)			
Clasificación de grupo	A-1		A-3 ^A	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Consistencia											
Límite líquido	...		...	B				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		N.P.	B				10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín. ^B
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

^A La colocación de A3 antes de A2 en el proceso de eliminación de izquierda a derecha no necesariamente indica superioridad de A3 sobre A2.

^B El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor que LL-30. El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL-30.

Figura 2. Clasificación AASHTO.
Fuente: UNAL.

2.2.1.9. Sistema de clasificación unificada de los suelos

La forma original del sistema de clasificación de suelos fue desarrollada por Arturo Casagrande, ingeniero geotécnico, en 1942.

La clasificación es basada en las propiedades de plasticidad y en la distribución del tamaño de grano, según esta última, el sistema divide el suelo en dos grandes categorías:

- **Suelo grueso granulares:** dentro de ellos están las fracciones de arena y grava, son suelos donde la distribución del tamaño y la forma de los granos hace al suelo más poroso.
- **Suelo fino granulares:** en estos suelos se incluyen las fracciones limo y arcilla, así como las fracciones de carácter orgánico. La plasticidad de este suelo es mucho mayor.

2.2.2. Técnicas para la medición de humedad del suelo

Para el desarrollo de este proyecto es necesario conocer las distintas técnicas para la medición de humedad en suelos, así mismo es conveniente familiarizarse con las características y propiedades de los suelos.

A continuación se realizará una búsqueda de las técnicas usadas para la medición de humedad en suelos con el fin de elegir y profundizar en una de estas.

Algunos de los criterios a tener en cuenta a la hora de la elección del método de medición de humedad son:

- Las características del suelo (materia orgánica, textura, topografía).
- A quien va dirigido el equipo (sensor).
- Presupuesto disponible.

Una vez elegida la técnica a usar será más fácil plantear un acercamiento teórico para tener un enfoque en los parámetros que son de interés tanto para obtener la medida como para su posterior uso en fines agrícolas.

Podemos encontrar diversas formas para estimar el contenido de agua en suelos, todos los métodos usan una propiedad física que cambia con la humedad como el peso del suelo, tensión del agua dentro del suelo, humedad del aire dentro del suelo, constante dieléctrica del suelo, resistencia eléctrica del suelo, textura del suelo, energía necesaria para cambiar la temperatura del suelo, entre otros.

Existen diferentes tipos de métodos para la medición de humedad del suelo, métodos directos que miden la cantidad de agua en el suelo, métodos indirectos que calculan la humedad mediante un ajuste entre la humedad y una propiedad que es más fácil de medir como la constante dieléctrica del suelo, la gran mayoría de los métodos son indirectos.

Método gravimétrico: este método es un método destructivo, consiste en extraer una muestra del suelo y pesarla (M_t), se procede a secar en un horno a 105° y posteriormente se pesa la muestra seca (M_s). Unidad gravimétrica (W)

El método gravimétrico es el más exacto de todos, de hecho se usa para calibrar a los demás.

Desventajas: necesita mucho tiempo, es costoso y no es viable para el monitoreo ya que se extrae una muestra del terreno y no hay posibilidad de repetir la medida sobre la misma muestra.

Método Tensiométrico: estima el contenido de humedad a partir de la presión que ejerce el suelo sobre una determinada muestra de agua, cuando sea el contenido de agua en el suelo mayor será la succión del mismo sobre la muestra. A partir de esta propiedad es posible estimar el contenido de agua en el suelo. Uno de los instrumentos más usados es el tensiómetro.



Figura 3. Tensiómetro para la medición de humedad del suelo.
Fuente: TRAXCO.

Método higrométrico: la relación entre el contenido de humedad en medios porosos (suelo) y la atmósfera muchas veces es conocida, a partir de la medida de la humedad relativa sobre el suelo es posible determinar el contenido de agua en el suelo.

Método térmico: es un método más reciente que consiste en obtener una estimación de contenido de humedad en el suelo, midiendo la transferencia de calor de suelo o de otro material poroso insertado en este. Por lo tanto a partir de la medida de temperatura es posible estimar el contenido de agua en los suelos.

Método resistivo: se basa en medir la resistencia entre dos electrodos conectados en el suelo o a través de un material poroso insertado dentro del suelo (bloque de yeso) y a partir de este valor calcular el contenido de humedad, sumiendo que el agua es el principal causante del cambio en la conductividad del suelo.

Óptico: La técnica es similar a TDR, con la diferencia que se utilizan señales ópticas, estudiando los tiempos de viaje, la atenuación y la reflexión en el suelo para obtener el contenido de agua en el suelo.

Nuclear: Esta técnica consiste en emitir una señal radiactiva contra el suelo. Las partículas de la misma interaccionan y rebotan contra las del suelo y algunas de estas partículas son captadas por el mismo instrumento que genera la señal. A partir de la evaluación de esta señal es posible estimar el contenido de agua en el suelo.

Método capacitivo: se mide la capacitancia de un par de electrodos (capacitor) cuyo dieléctrico sea el suelo y a partir de esta medida se estima la constante dieléctrica del suelo, la cual tiene relación con la cantidad de agua que hay en este.

Método de reflectometría: Time Domain Reflectometry (TDR) la reflectometría se basa en la relación que existe entre el contenido de agua y su constante dieléctrica, el agua tiene una constante dieléctrica mucho más alta que la del suelo, por lo que la constante del suelo húmedo depende principalmente de su contenido de agua. La constante dieléctrica del suelo se mide emitiendo un pulso electromagnético de corta duración a través del suelo y se mide el tiempo de ida y vuelta que tarda en reflejarse la onda [21].

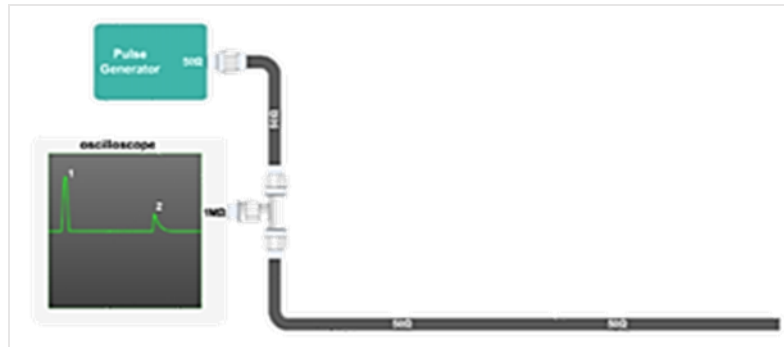


Figura 4. Diagrama principio de funcionamiento de un medidor TDR.
Fuente: Autor.

Las principales ventajas de TDR sobre otros métodos de medida de humedad de suelos son:

- Mayor precisión de hasta 1% o 2% en el contenido volumétrico de agua.
- Los requerimientos de calibración son mínimos, en muchos casos no se requiere calibración específica según el suelo.
- Ausencia de peligros de radiación asociados a técnicas de Sonda de Neutrones o técnicas de atenuación de rayos gamma.
- TDR tiene una excelente resolución espacial y temporal.
- Las medidas son fáciles de obtener, y el método es capaz de proveer medidas continuas mediante automatización y multiplexado.

2.2.2.1. Método para la medición

En la sección anterior se plantearon una serie de técnicas usadas para la medida de humedad en suelos, de las técnicas descritas se ha hecho un enfoque en las más prácticas y con instrumentos de uso generalizado en el monitoreo de humedad en cultivos.

El uso de instrumentos similares a los estudiados ha sido descartado en base a las siguientes consideraciones:

- El tensiómetro es una técnica muy popular pero a su vez es muy primitiva ya que es utilizado para medición “in situ”, no para el monitoreo remoto. La técnica requiere de mantenimiento periódico de los sensores debido a que es un método esencialmente mecánico.

- Las sondas de neutrones, son dispositivos muy complejos y su costo es muy alto, además funciona con materiales radioactivos.
- Los sensores de tipo resistivo tienen la ventaja de proporcionar directamente una magnitud eléctrica, pero el valor obtenido se encuentra bastante influenciado por las características del suelo, su uso ha sido desplazado por el desarrollo y avance de otras técnicas electrónicas como métodos capacitivos y TDR.
- Los sensores TDR necesitan instalación de tubos de acceso que deben quedar en estrecho contacto con el suelo, además su precio es elevado.

Por lo tanto el método capacitivo es el más factible y adecuado para el desarrollo del sensor, esto se debe a que es una técnica que permite realizar un monitoreo constante en diferentes profundidades del suelo con mínimo mantenimiento, trabajando además con valores eléctricos.

A continuación se realiza un análisis detallado acerca de la técnica de capacitancia y sensores capacitivos.

2.2.2.1.1. Sensores capacitivos

Este tipo de sensores deducen la constante dieléctrica del suelo a partir de la medida de capacidad del mismo. La constante dieléctrica está formada por la combinación de las constantes de los distintos materiales que componen al mismo, la constante dieléctrica del agua es mayor que la de los demás materiales como el suelo y los electrodos o placas (una relación aproximada de 20 a 1) por lo que los cambios en la constante dieléctrica tienen una dependencia bastante alta con el volumen de agua contenido en el suelo.



Figura 5. Sensor capacitivo para la medición de humedad en el suelo.

Fuente: Autor.

La técnica más utilizada para este tipo de sensores consiste en la sintonización de un oscilador a partir de la capacidad del suelo. Es decir, el circuito se construye de forma que la capacidad del suelo altere la frecuencia de resonancia del circuito,

por lo que a partir de la medida de esta frecuencia se puede obtener el valor de la capacidad del suelo, y a partir de esta el valor de la constante dieléctrica.

Usualmente se tiene un circuito resonante LC a una frecuencia conocida, y se construye el circuito de forma de sumar la capacidad del suelo a la del oscilador, por lo que los cambios en la constante Dieléctrica del suelo produce variaciones de la frecuencia del oscilador en torno a la frecuencia original, lo cual se puede medir y a partir de esto obtener la capacidad del suelo.

El circuito oscilador puede implementarse de múltiples otras formas, incluyendo circuitos digitales tipo Astable o a partir de osciladores RC ajustados por microprocesadores. Otra técnica no tan utilizada, planteada principalmente en artículos académicos y diseños alternativos más que en soluciones comerciales consiste en la creación de un puente de impedancias, que esencialmente iguale el valor de una impedancia variable electrónicamente a la impedancia aparente del suelo [22].

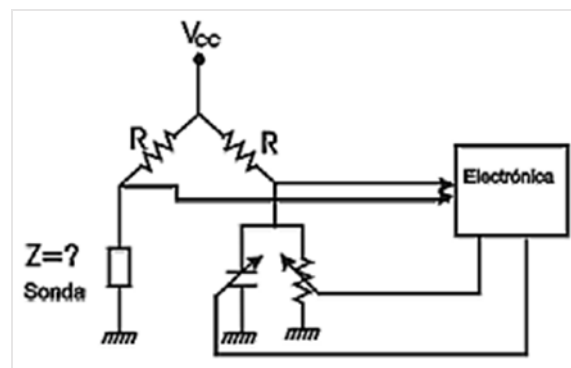


Figura 6. Puente de impedancias.
Fuente: Autor.

La relación entre capacitancia y permitividad de un material situado entre las placas de un capacitor de placas paralelas está dada por:

$$C = \epsilon \frac{A}{D}$$

En donde C es la capacitancia, ϵ es la permitividad del material, A es el área de las placas y d es la separación entre ellas. Esta relación es válida para campos eléctricos constantes. Para un campo eléctrico que oscila armónicamente a una frecuencia ω , como se vio, se introduce el concepto de Permitividad Dieléctrica Compleja (también se suele emplear el término constante dieléctrica compleja) permitiendo que ϵ resulte compleja, es decir se hace que:

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$$

La parte real de esta constante tiene una fuerte relación con el contenido de agua en el suelo, lo cual se puede explicar basado en que la permitividad es una medida de la capacidad de polarización de un medio sujeto a un campo eléctrico variable en el tiempo, y esencialmente la fracción de suelo que contiene esta propiedad de polarización es la que contiene los dipolos de la molécula de agua.

2.2.3. Sensores comerciales

A continuación se describen algunos equipos utilizados para la medición de la humedad en el suelo, detalles de su implantación, funcionamiento y sus características técnicas.

2.2.3.1. Sensores

2.2.3.1.1. Sentek EnviroSCAN Probe

Este dispositivo de campo es desarrollado por Sentek Technologies. Este instrumento permite evaluar el contenido de agua del suelo a diferentes profundidades en forma rápida y continua, además, casi sin disturbar las condiciones de suelo circundantes. Es fácilmente automatizable.



Figura 7. Sonda EnviroScan.
Fuente: Autor.

Su funcionamiento se basa en la Reflectometría de Dominio de Frecuencias (FDR), que explica cómo la capacitancia dieléctrica de un condensador que utiliza al suelo como dieléctrico depende del contenido de agua del mismo, tal, que conectando a este condensador un oscilador formando un circuito eléctrico, los cambios de humedad del suelo pueden ser detectados por cambios en su frecuencia de operación. En la Figura 2, se visualiza el modo en que se funciona este circuito eléctrico.

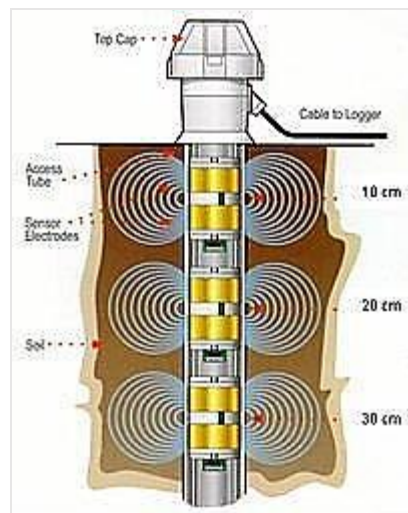


Figura 8. Esquema del funcionamiento de los sensores de la sonda EnviroScan.
Fuente: Autor.

En la sonda mostrada en la figura 8, se puede ver el procesador que transforma la señal de frecuencia medida a valores de contenido volumétrico de humedad del suelo, puede realizar medidas tanto discretas como continuas y la transmisión de datos puede ser vía cable, módem telefónico o radio.

Cabe mencionar que la zona de influencia al efectuar las medidas es pequeña (4 cm de radio aproximadamente), además de que su instalación debe ser especialmente cuidadosa para conseguir contacto íntimo entre el sensor y el suelo y evitar espacios vacíos. A esto se suma la necesidad de ser calibrado específicamente para cada tipo de suelo.

La instalación de los dispositivos consiste en su enterramiento a la profundidad deseada dentro de un tubo de PVC, quedando a la vista únicamente la tapa del tubo. La sonda consta de 3 anillos, cada uno a distinta profundidad, con el fin de obtener una estimación del perfil de humedades del suelo en cada medida.

Este sensor está basado en microprocesador, por lo que para el registro de la información tomada por este sensor, es necesario el uso de una interfaz SDI-12 (Serial Data Interface at 1200 baud). Esto permite que las sondas se integren con un datalogger Campbell Scientific o estación meteorológica.

Especificaciones:

- Sensores máximos por sonda estándar: 16
- Sensor de medida Principio: capacitancia de alta frecuencia
- Salida: Versión 1.2 SDI-12
- Consumo actual:
Sueño: 250 μ A, En espera: 66 mA, Muestreo: 100 mA
- Contenido de Agua de lectura Rango: 0 a ~ 65%
- Efectos de la temperatura: $\pm 3\%$ (5 ° a 35 ° C)
- Hora de leer un sensor: 1,1 segundos
- Esfera de influencia: 99% de la lectura se realiza dentro de un radio de 10 cm desde el exterior del tubo de acceso
- Diámetro (sensor) 5,05 cm (2,0 pulgadas)
- Diámetro (tubo de acceso): 5,65 cm (2,2 pulgadas)
- Longitud de la sonda: 0.5, 1.0, 1.5, o 2.0 m
(1.6, 3.3, 4.9, ó 6.6 pies)
- Temperatura de funcionamiento: -20 ° a 75 ° C

2.2.3.1.2. Diviner 2000

La Diviner 2000 es un sistema portable y robusto para medición de humedad de suelo, usa un sistema patentado Swipe and Go que permite tomar medidas automáticamente cada 10 cm de profundidad sin necesidad de frenar la sonda en cada horizonte. Esto significa que el sensor de Capacitancia incluido en la sonda Diviner 2000 simplemente hay que hacerlo bajar y subir a través del Tubo de Acceso para que almacene 16 lecturas en unos pocos segundos. La Diviner 2000 utiliza sensores con la reconocida tecnología de Frequency Domain Reflectometry (FDR) para medir la humedad de suelo en el perfil.



Figura 9. Sistema portable Diviner2000.
Fuente: Autor.

Display de la Diviner 2000:

Almacena datos de hasta 99 sitios diferentes, los datos se visualizan en una pantalla LCD de alta resolución, visualización gráfica y en tablas de los datos de humedad de suelo para toma de decisiones instantáneas, permite la bajada de datos a Pc y manejo a través del Software IrriMAX.

Tubos de Acceso:

Sonda diseñada y construida para aumentar la repetibilidad del sensor, el sensor de la Diviner 2000 no entre en contacto con el suelo, no hay flujo preferencial de agua alrededor del cuerpo de la sonda, minimiza los disturbios del suelo y las raíces activas. Tubos de Acceso compatibles con los de las sondas de los sistemas EnviroSCAN, EnviroSMART y TriSCAN

2.2.3.1.3. Drill & Drop

El Drill & Drop es una sonda de medición de humedad de suelo totalmente encapsulada, y fácil de instalar. Los sensores están disponibles en cuatro longitudes, 30cm, 60cm, 90cm y 120cm, con sensores fijos cada 10 cm.

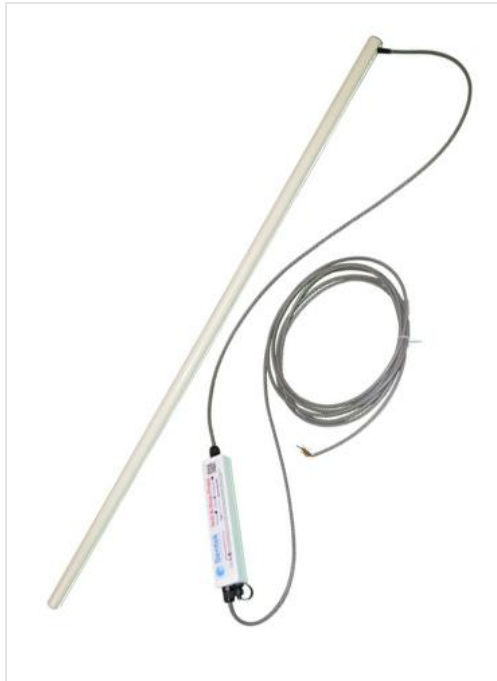


Figura 10. Sonda Drill & Drop.
Fuente: Autor.

Debido a la facilidad de instalación y la excelente protección de la electrónica, el Drill & Drop es ideal para situaciones en las que se puede necesitar una sonda para moverse entre sitios de corto plazo y para cultivos anuales. Tener la electrónica completamente encapsulada también permite la adecuación del equipo en instalaciones de largo plazo, donde pasará a menudo la maquinaria.

La sonda es de forma cónica y coincide con la forma del barreno con que se instala, logrando una instalación directa. Este método de instalación directa significa que la sonda mide las condiciones representativas del suelo 'reales' inmediatamente después de la instalación, ya que el suelo circundante no es intervenido.

- Dos opciones de longitud de sonda - 60cm y 120cm
- Opción para medir la humedad y la temperatura o la humedad y la temperatura y la salinidad del suelo en cada intervalo de 10 cm

- Extremadamente rápido y fácil de instalar sin perturbaciones debido a la forma cónica
- Material de encapsulamiento estable
- Capaz de ser enterrado a cualquier profundidad
- Probada la humedad del suelo y la calidad de las mediciones de salinidad por Sentek
- Sensores Pre-normalizadas con la ecuación de calibración incorporada

2.2.3.1.4. Sonda ECH2O

Las Sondas de humedad del suelo ECH2O de DECAGON DEVICES Inc. se emplean en todo el mundo para medir la humedad del suelo. Las Sondas de humedad del suelo ECH2O son sondas capacitivas (FDR) que miden la permisividad dieléctrica del suelo para calcular el contenido volumétrico de agua (VWC).



Figura 11. Sonda ECH2O.
Fuente: Autor.

Ventajas:

- Nivel prestaciones similares a las proporcionadas por un sensor TDR pero a un coste mucho menor
- Al contrario de lo que ocurre con otros sensores, no son sensibles a la textura y a valores normales de CE del suelo.
- Diseño robusto y de larga duración para monitorizar a largo plazo
- La calibración es válida para la mayoría de suelos minerales y substratos con niveles normales de salinidad
- Necesidades de alimentación muy bajas
- Instalación sencilla a cualquier profundidad (diseño modular) y orientación en el perfil del suelo
- Medidas reales del perfil del suelo

Modelos:

- **EC-5**, medida de la humedad del suelo (VWC) en un área de influencia pequeña
- **10HS**, medida de la humedad del suelo (VWC) en un área de gran influencia
- **5TM**, medida de la humedad del suelo (VWC) y la temperatura del suelo
- **5TE**, medida de la humedad del suelo (VWC), la Temperatura y la Conductividad Eléctrica (CE) del suelo
- **GS3**, medida de la humedad (VWC), la Temperatura y la Conductividad Eléctrica (CE) en sustratos y materiales de granulometría gruesa
- **MAS-1**, medida de la humedad del suelo (VWC) con salida 4-20 Ma

2.2.3.2. EL SOFTWARE

Los datos de alta resolución mostrados en el potente programa Irrimax muestran valiosa información y profundo conocimiento del complejo continuo suelo-agua-planta-atmósfera. El dato queda representado en una imagen continua del movimiento del agua y el consumo de la planta bajo condiciones cambiantes de suelo, de los estados fenológicos y del clima. El Irrimax permite conocer de forma simple y clara la sumatoria de la humedad de suelo dentro del área de raíces, mostrando:

- Dinámica de agua en el suelo o patrones de consumo de agua por parte de cultivos.
- Permite definir FRECUENCIA DE RIEGO.
- Estrés por saturación.
- Estrés por déficit de agua.
- visualizar registros de precipitaciones, riegos y ETo.

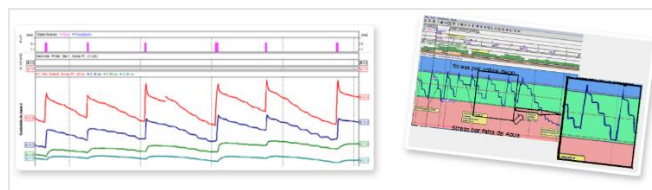


Figura 12. Ilustración de registros en Irrimax.

Fuente: Autor.

Además, puede visualizar datos de humedad de suelo en múltiples profundidades en combinación con registros de precipitaciones y riegos, mostrando claramente:

- Dinámica de agua en cada perfil del suelo para definir TIEMPO DE RIEGO.

- Tasas de infiltración efectivas y profundidades que alcanzan lluvias y riegos.
- Profundidades de raíces activas en distintas etapas de crecimiento del cultivo.
- Cantidades de agua consumidas y evapotranspiración real de distintas áreas en la zona de raíces activas.

2.2.3.3. Datalogger

Un registrador de datos (datalogger) es un dispositivo electrónico que registra datos en el tiempo o en relación a la ubicación por medio de instrumentos y sensores propios o conectados externamente (termopares). Casi todos están basados en microcontroladores. Por lo general son pequeños, con pilas, portátiles, y equipados con un microprocesador, memoria interna para almacenamiento de datos y sensores. Algunos registradores de datos se comunican con un ordenador personal y utilizan software específico para activar el registrador de datos, ver y analizar los datos recogidos, mientras que otros tienen un dispositivo de interfaz local (teclado, pantalla LCD) y puede ser utilizado como un dispositivo independiente.



Figura 13. Registrador de datos (DataLogger).

Fuente: Autor.

Protocolos de comunicación:

Varios protocolos han sido normalizados, incluyendo un protocolo inteligente, el SDI-12, existen algunos instrumentos que permiten conectarlos a una variedad de registradores de datos. El uso de esta norma no ha ganado mucha aceptación fuera de la industria del medio ambiente. Algunas compañías fabricantes de registradores de datos también están apoyando el estándar MODBUS, este se ha

utilizado tradicionalmente para control industrial y existen numerosos instrumentos industriales que soportan este estándar de comunicación.

En cuanto a su funcionalidad:

- Miden sensores.
- Procesan los datos internamente.
- Inician medidas y realizan funciones de control en función de tiempo o evento.
- Controlan dispositivos externos como bombas, motores, alarmas, válvulas, etc.
- Operan independientemente de la red de 220Vac, de ordenadores y de la interacción humana.
- Usan nuestro software para PC para programar el datalogger.
- Consumen mínima potencia de una fuente de 12 Vdc.
- Conexión in-situ y por telecomunicaciones.

3. TIPO Y METODO DE INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El siguiente trabajo presenta una investigación de carácter básico y aplicado, con el cual se pretende extender el progreso científico mediante la evolución de conocimientos teóricos interesándonos directamente en sus aplicaciones y consecuencias prácticas, estableciendo la necesidad de conocer para hacer, construir, diseñar, actuar o modificar una idea en el ejercicio, además se presentará un desarrollo tecnológico para la solución de problemas prácticos y un desarrollo de productos y procesos para la obtención de resultados concretos que se puedan posicionar en el mercado.

3.2. METODOLOGÍA

Para realizar una investigación de naturaleza científica, llevamos a cabo la elaboración y seguimiento de cinco fases y se explican a continuación:

- **Objetivos:** En esta primera fase se plantearán los objetivos generales y específicos de nuestro proyecto, teniendo en cuenta las márgenes y límites de nuestro adelanto.
- **Información:** En esta etapa la meta es recolectar la teoría científica pertinente en la cual nos basaremos durante el proceso de investigación.
- **Viabilidad:** Con respecto a la recopilación de información revisaremos puntualmente las posibilidades de llevar a cabo nuestro proyecto y en tal caso de ser poco viable, replantearemos los objetivos.
- **Diseño:** En este ciclo esquematizaremos el prototipo basados en el adelanto teórico compilado con el fin de satisfacer nuestras metas.
- **Resultados:** Análisis y observación de los resultados logrados conforme a los objetivos planteados y al diseño fabricado.
- **Conclusiones:** Corresponde a el estudio, comparación y distinción de los objetivos propuestos y los resultados alcanzados.

4. METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE SENSORES

En este apartado se describe el proceso de recolección y acondicionamiento del suelo para realizar las mediciones de humedad y comparar los datos obtenidos del sensor tipo sonda con un sensor comercial.

4.1. EXTRACCIÓN DE MUESTRA DEL SUELO DE LA UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS

Se escogieron muestras de suelo aptas para cultivo y se llevaron al laboratorio de suelos para realizar el respectivo procedimiento.



Figura 14. Extracción de la muestra del suelo.
Fuente: Autor.

Se realiza la debida adaptación del suelo para unos resultados eficientes, se toma la muestra de suelo y a continuación es pasada por el tamiz.



Figura 15. Tamiz.
Fuente: Autor.

En la figura 8, se muestra el tamiz, implemento usado para el colado del suelo, con el fin de que el suelo quede sin residuos como piedras, raíces y componentes no propios del este.



Figura 16. Proceso de tamizado.
Fuente: Autor.

Después de tamizado el suelo, se procede a realizar el secado del mismo, para lograr el secado del suelo, este se esparce uniformemente por una superficie plana, como se ilustra en la siguiente figura.



Figura 17. Proceso de secado del suelo.
Fuente: Autor.

En las siguientes imágenes se muestra la comparación de la apariencia del suelo luego del proceso de secado de 24 y 48 horas. Siendo el de 48 horas, el punto de secado óptimo.



Figura 18. Apariencia de secado del suelo después de 24 horas (izq) y después de 48 horas (der).

Fuente: Autor.

4.2. PORCENTAJE DE HUMEDAD GRAVIMÉTRICA DEL SUELO A PARTIR DE LA CAPACIDAD DE CAMPO MÁXIMA

El objetivo de este experimento es determinar el punto máximo de humedad del suelo, que es cuando el suelo está saturado en agua.

La capacidad de campo se determina en el campo o se estima en el laboratorio con diferentes métodos. El procedimiento para determinar la capacidad de campo radica en someter el suelo a un riego pesado, cubrir con plástico la zona y muestrear, para determinar la humedad en tiempos consecutivos, hasta que el contenido de la misma vuelva a ser constante [23].

Se toma aproximadamente 1kg (1.408 Kg) de muestra de suelo, que será utilizado para la prueba.



Figura 19. Peso de la muestra de suelo.
Fuente: Autor.

Posteriormente se agrega a la muestra 1L de agua, con el fin de saturarla al máximo, como se muestra en la Figura 20.

Luego se deja drenar la muestra de suelo a su máxima capacidad de campo por un periodo de 24 horas. Después de transcurrido el periodo de tiempo, se sacan unas pequeñas muestras en cápsulas que serán llevadas a un horno y puestas a 105°C por un periodo de 120 horas, de estas muestras se toma su peso y son enumeradas para hacer el debido análisis. Figura 21.



Figura 20. Prueba de capacidad de campo máxima del suelo.
Fuente: Autor.



Figura 21. Muestra de suelo drenado y cápsulas.
Fuente: Autor.



Figura 22. Muestras de suelo a su máxima capacidad de campo en pequeñas cápsulas.
Fuente: Autor.

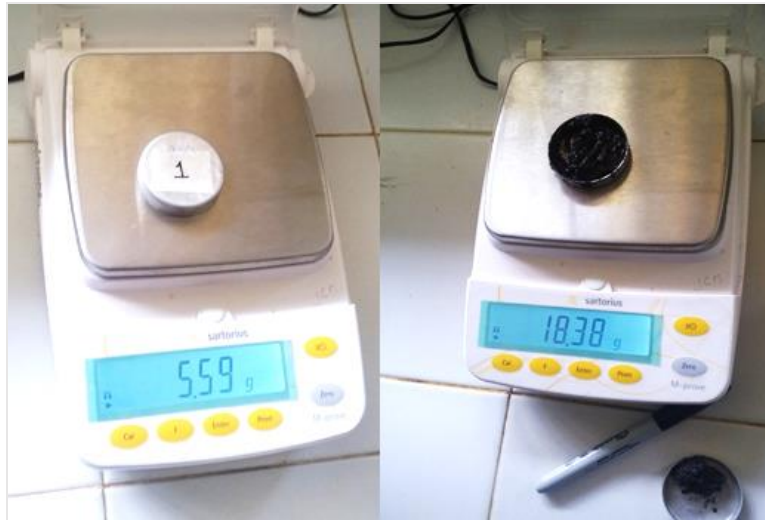


Figura 23. Peso de las muestras en cápsulas.
Fuente: Autor.



Figura 24. Horno para secado de las muestras.
Fuente: Autor.

Después de transcurridas las 120 horas en el horno, se sacan las muestras y se procede a pesarlas para determinar el porcentaje de la humedad gravimétrica del

suelo (Hg), que se define como la relación entre la masa del agua y la masa seca de los sólidos del suelo, también se conoce como contenido de agua gravimétrica, el termino masa seca de los sólidos se refiere al suelo seco en la estufa de 105°C a 110°C, hasta que la masa se hace constante [24] y se calcula mediante la siguiente ecuación [25].

$$Hg = \frac{Mshc - Mssc}{Mssc - Mc} \times 100\%$$

Donde:

Hg: Porcentaje de humedad gravimétrica del suelo.

Mshc: Masa del suelo húmedo + cápsula.

Mssc: Masa del suelo seco + cápsula.

N° Cápsula	Masa cápsulas vacías (gr)	Muestra saturada (gr)	Muestra suelo seco (gr)	Humedad gravimétrica	Humedad gravimétrica (%)
C1	5,59	18,38	12,64	0,8142	81,42
C2	5,49	20,17	8,8	0,716	71,6
C3	5,5	10,89	8,66	0,7057	70,57
C4	5,52	14,01	10,43	0,7291	72,91
C5	5,44	7,93	6,91	0,6939	69,39
C6	5,18	11,53	8,95	0,6843	68,43
C7	5,53	16,2	11,65	0,7435	74,35
C8	5,62	13,06	9,83	0,7672	76,72
C9	5,68	14,76	10,76	0,7654	76,54
C10	7,57	23	16,59	0,7106	71,06

**Tabla 1. Cálculo de humedad gravimétrica del suelo. Peso del suelo: 1Kg.
Fuente: Autor.**

Teniendo en cuenta los resultados del porcentaje de humedad gravimétrica de la Tabla 1, se toma la decisión de anular el dato de la cápsula 1 (CM1) debido a tiene una desviación muy grande comparado con los demás datos.

Promedio de porcentaje de humedad gravimétrica:

$$Hg = 72,39\%$$

En la prueba se tomó un anillo como se muestra en la Figura 25 con el fin de calcular la densidad aparente del suelo, la cual incluye el volumen total de espacios porosos que afecta la difusión de gases en él, su permeabilidad, el grado de penetración radical y el régimen térmico [26].

La determinación de la densidad aparente involucra conocer la masa del suelo, es decir, el volumen de las partículas y espacios vacíos entre ellas (macro y micro poros), está también afectada por el contenido orgánico [27].



Figura 25. Extracción y peso de la muestra del anillo.
Fuente: Autor.

Descripción	Valor
Masa anillo (gr)	183,06
Masa anillo + suelo (gr)	321,64
Masa suelo extraído (gr)	45,2
Diámetro del anillo (cm)	5,6
Altura del anillo (cm)	4,1
Volumen del anillo (cm ³)	100,98

Densidad aparente del suelo (gr/ cm ³)	0,925
--	-------

Tabla 2. Datos para el cálculo de densidad aparente del suelo.
Fuente: Autor.

4.3. LLENADO DE MATERAS PARA LA MEDICIÓN CON SENSORES VH400 (VEGETRONIX):

Después del proceso de secado del suelo que duro 48 horas, en primer lugar, se procede a llenar las materas con la muestra de suelo óptimo para la prueba, el peso de cada una se puede observar en la Tabla 3.



Figura 26. Llenado de materas con suelo seco.
Fuente: Autor.



Figura 27. Pesado de materas con muestras de suelo seco.
Fuente: Autor.

Ahora se procede a agregar diferentes porcentajes de agua destilada, (ver Tabla 3) a las materas con suelo seco, dejando que el agua se drene y ocupe el mayor espacio posible.

N° Matera	Masa (Kg)	Agua (%)	Agua (L)
M0	1,134	0	0
M1	1,256	10	0,125
M2	1,126	20	0,2252
M3	1,292	30	0,3876
M4	1,328	40	0,5312
M5	1,194	50	0,597
M6	1,118	60	0,6708
M7	1,117	70	0,7819
M8	1,096	80	0,8768
M9	1,142	42	0,478
M10	1,356	22	0,3

Tabla 3. Materas con porcentaje de agua según su masa.
Fuente: Autor.

Se toma la densidad de agua como 1 gr/cm^3 , debido a esto hacemos un cálculo para relacionar la masa con la cantidad de agua en porcentaje y posteriormente se convierte a litros para agregar al suelo con la ayuda de un vaso precipitado y una probeta, para suministrar cantidades exactas a las materas.

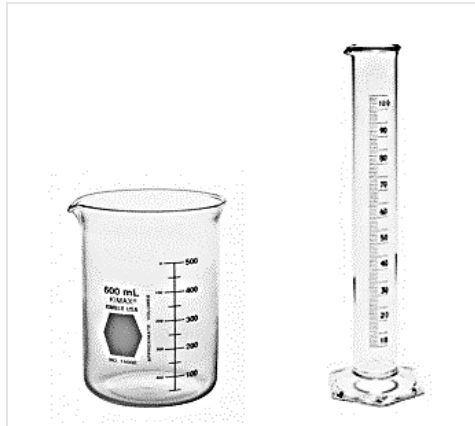


Figura 28. Vaso de precipitado y probeta.
Fuente: Autor.



Figura 29. Llenado de materas con diferente cantidad de agua.
Fuente: Autor.

Más tarde, se acomodan los sensores de humedad VH400 a 80mm de profundidad y realizamos las mediciones en voltaje para cada una de las materas con los cuatro sensores de humedad.



Figura 30. Sensor de humedad VH400.
Fuente: Vegetronix™.



Figura 31. Ajuste de los sensores de humedad VH400.
Fuente: Autor.



Figura 32. Sensor de humedad VH400 a 80 mm de profundidad.
Fuente: Autor.

Profundidad (mm)	Sensores VH400			
	S1 (v)	S2 (v)	S3 (v)	S4 (v)
80	0,72	0,75	0,9	0,25
85	0,89	0,88	1,26	0,45
80	0,9	1,35	1,65	0,47
85	1,56	1,89	2,63	0,94
85	2,15	2,21	2,85	1,83
85	2,73	2,68	2,66	2,45
85	2,75	2,87	2,93	2,76
85	2,92	2,89	2,92	2,68
85	2,9	2,21	2,93	2,5
85	2,78	2,74	2,93	2,66
85	1,28	1,8	1,5	1,34

Tabla 4. Medición de los sensores de voltaje en las muestras de suelo.

Fuente: Autor.



Figura 33. Medición de voltaje en sensores de humedad VH400.
Fuente: Autor.

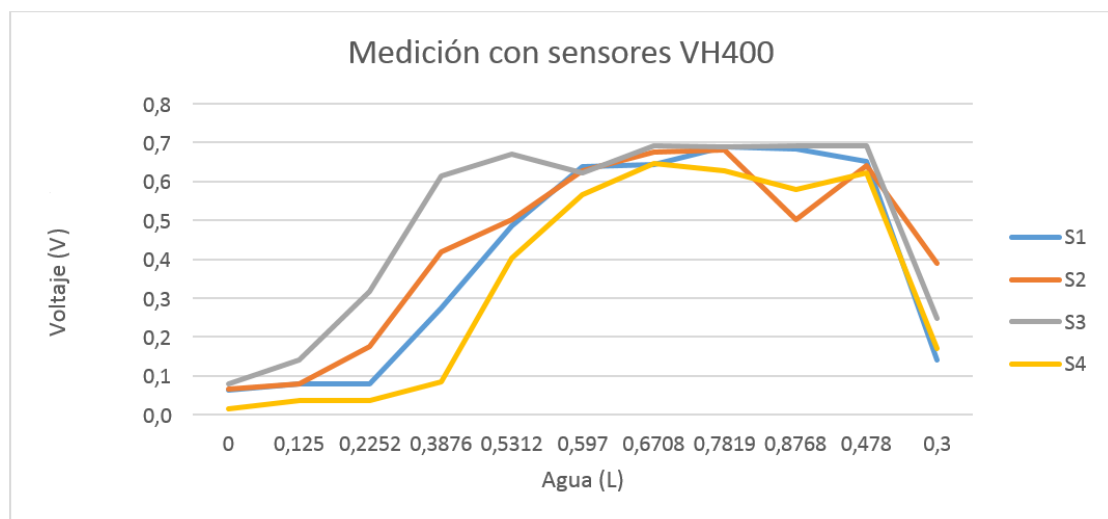


Figura 34. Gráfica de voltaje contra cantidad de agua del sensor de humedad VH400.
Fuente: Autor.

El VH400 es un sensor de humedad de bajo costo, que permitió el monitoreo de la humedad del suelo en 4 diferentes muestras, como se observa en la Figura 31.

Esta sonda mide la constante dieléctrica del suelo mediante técnicas de líneas de transmisión insensibles a la salinidad del agua e inmunes a la corrosión con el tiempo, las sondas son pequeñas, robustas y de baja potencia.

En comparación con otros sensores como los de bloques de yeso, esta sonda ofrece un tiempo de respuesta rápido, se pueden insertar y tomar una lectura en menos de un segundo [28].

El VH400 consume más energía que los sensores de su tipo, ya que funciona a una frecuencia mucho más alta, sin embargo, es mucho más sensible en los niveles superiores VWC, y las curvas son más lineales.

Da una respuesta en voltaje, lineal por tramos, por lo cual no necesitaremos linealizar el sensor VH400.

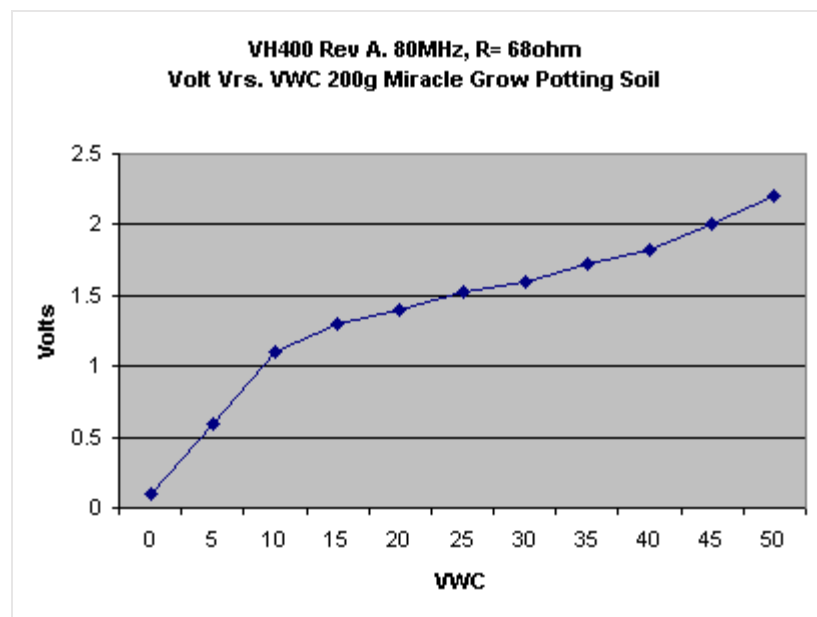


Figura 35. Curva de comportamiento del sensor VH400.
Fuente: Autor.

Por medio de las siguientes ecuaciones, teniendo en cuenta los rangos de voltaje medidos, realizamos el cálculo de VWC para establecer la medida numérica de humedad del suelo.

Rango voltaje (V)	Ecuación (VWC)
-------------------	----------------

0 - 1,1	10 * V-1
1,1 - 1,3	25 * V-17,5
1,3 - 1,82	48,08 * V-47,5
1,82 - 2,2	26,32 * V-7,89

Tabla 5. Ecuación de VWC para diferentes rangos de voltaje.
Fuente: Autor.

Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3		Sensor 4	
(V)	(VWC)	(V)	(VWC)	(V)	(VWC)	(V)	(VWC)
0,720	6,200	0,750	6,500	0,900	8,000	0,250	1,500
0,890	7,900	0,880	7,800	1,260	14,000	0,450	3,500
0,900	8,000	1,350	17,408	1,650	31,832	0,470	3,700
1,560	27,380	1,890	41,855	2,630	61,332	0,940	8,400
2,150	48,698	2,210	50,277	2,850	67,122	1,830	40,276
2,730	63,964	2,680	62,648	2,660	62,121	2,450	56,594
2,750	64,490	2,870	67,648	2,930	69,228	2,760	64,753
2,920	68,964	2,890	68,175	2,920	68,964	2,680	62,648
2,900	68,438	2,210	50,277	2,930	69,228	2,500	57,910
2,780	65,280	2,740	64,227	2,930	69,228	2,660	62,121
1,280	13,940	1,800	39,044	1,500	24,620	1,340	16,927

Tabla 6. Datos de los sensores en voltaje y VWC.
Fuente: Autor.

Al final de las mediciones, tomamos una muestra de cada materia con contenido de agua y luego las introducimos en un horno a 105°C para luego pesar las muestras secas y realizar el respectivo cálculo para hallar los porcentajes de humedad gravimétrica y volumétrica.

N° Cápsula	Masa (gr) (Muestras con agua)	Masa (gr) (Muestras secas)	Humedad gravimétrica	Humedad gravimétrica (%)	Humedad volumétrica	Humedad volumétrica (%)
------------	----------------------------------	-------------------------------	----------------------	--------------------------	---------------------	-------------------------

C0	12,03	10,11	0,1658	16,58	0,1534	15,34
C1	10,44	9,75	0,2873	28,73	0,2657	26,57
C2	11,36	10,05	0,4358	43,58	0,4031	40,31
C3	9,75	8,46	0,4762	47,62	0,4405	44,05
C4	9,55	8,25	0,6244	62,44	0,5776	57,76
C5	11,97	9,46	0,7146	71,46	0,661	66,1
C6	12,57	9,49	0,7782	77,82	0,7198	71,98
C7	14,03	10,31	0,7451	74,51	0,6892	68,92
C8	17,29	12,32	0,72	72	0,666	66,6
C9	19,22	13,51	0,4286	42,86	0,3964	39,64
C10	10,67	9,81	0,3975	39,75	0,3677	36,77

Tabla 7. Cálculo de humedad gravimétrica y volumétrica de las muestras secas.

Fuente: Autor

En la Tabla 7 se halló la humedad gravimétrica que representa las láminas de agua (H_2O) por metro cuadrado de suelo, y se representa según la ecuación [25]:

$$Hv = \frac{pa}{pag} \times Hg$$

Donde:

Hg : Humedad gravimétrica.

Hv : Humedad volumétrica.

pa : Densidad aparente del suelo (g/ml).

pag : Densidad del agua (g/ml).

Tomamos la densidad del agua pag como $1 g/ml$, para que las fluctuaciones de la temperatura de la región no afectan la densidad del agua.

5. PRUEBAS Y MEDICIONES PRELIMINARES

5.1. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SENSOR CAPACITIVO PARA LA MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO

A continuación se presenta la implementación de un circuito para de capacitancia con el temporizador LM555 el cual es un dispositivo altamente estable para generar retrasos de tiempo u oscilaciones precisas, entre sus aplicaciones se encuentra la generación de pulsos, retrasos de tiempo, modulación por ancho de pulso, modulación por posición de pulsos, en este caso el circuito implementado es en modo astable el cual tiene como salida una señal cuadrada (Th: tiempo en alto y Tl: tiempo en bajo) la cual depende del capacitor (C) y las resistencias (Ra y Rb).

El tiempo de carga está dado por:

$$Th = 0.693(Ra + Rb)C$$

El tiempo de descarga está dado por:

$$Tl = 0.693(Rb)C$$

El periodo total es:

$$T = Th + Tl$$

Y la frecuencia de oscilación:

$$F = \frac{1}{T}$$

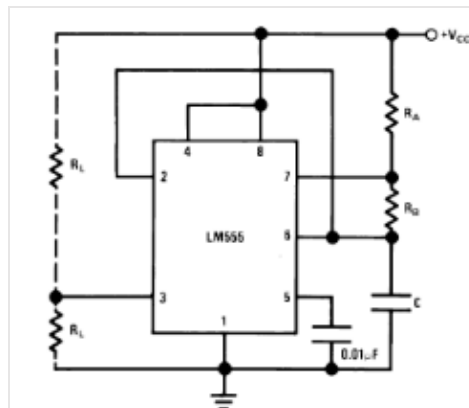


Figura 36. Circuito en modo astable con el temporizador LM555.

Fuente: Autor.

Una vez implementado el circuito procedemos a realizar pruebas con un capacitor cuyo valor sea conocido y realizamos el cálculo (R_a y R_b son resistencias fijas) y con ayuda de un osciloscopio capturamos y analizamos la señal de salida, la cual es una señal cuadrada, el tiempo en alto y tiempo en bajo debe ser aproximadamente al calculado con las fórmulas de tiempo de carga y tiempo de descarga, esto se hace con el fin de probar que el circuito esté en buen funcionamiento.

Como la señal de salida del circuito en modo Astable con LM555 es una señal cuadrada con una frecuencia determinada, acoplamos un circuito para la conversión de voltaje a frecuencia con el chip integrado LM2907 el cual es un conversor con alta ganancia (amplificador operacional, comparador), entre sus aplicaciones se encuentra la detección de baja o alta velocidad y también es usado en la industria automotriz en tacómetros para medir la velocidad de rotación de los mecanismos.

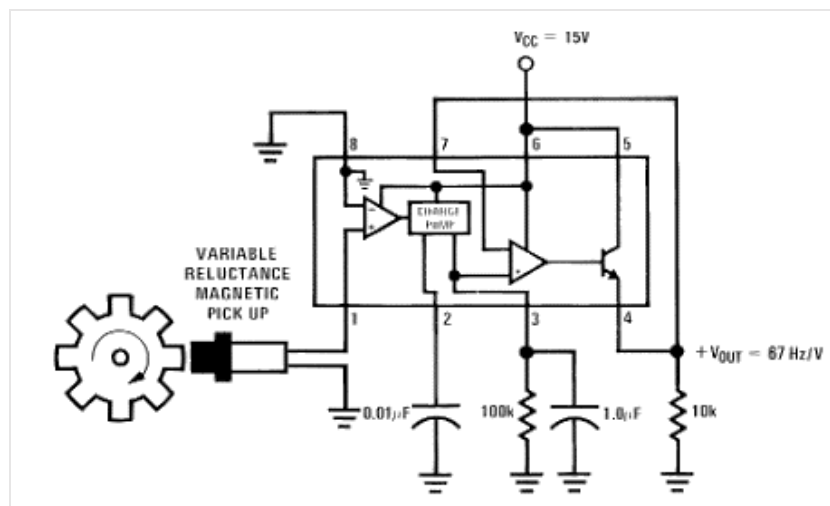


Figura 37. Esquema del conversor de frecuencia a voltaje LM2907.

Fuente: Autor.

Luego de implementar el circuito del conversor de frecuencia a voltaje se obtiene la señal de salida en forma de voltaje continuo, en relación a una entrada de tren de pulsos.



Figura 38. Señales de salida de los circuitos LM555 (amarilla) y LM2907 (roja).
Fuente: Autor.

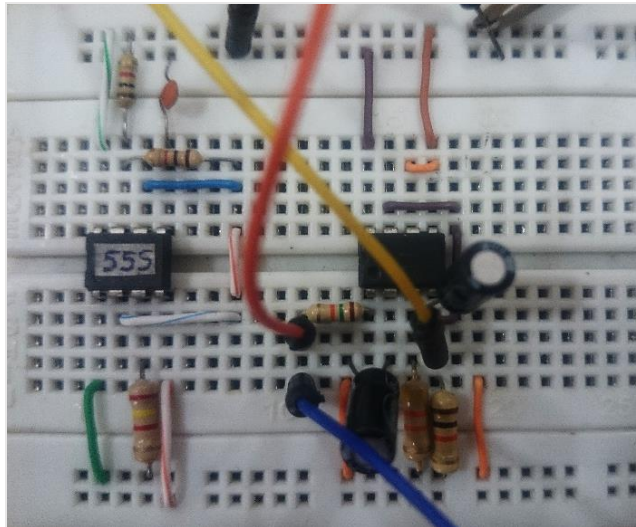


Figura 39. Circuito para la medición de capacitancia del sensor tipo sonda.
Fuente: Autor.

Después de hacer la prueba del funcionamiento del circuito, seguimos con la construcción del sensor capacitivo tipo sonda, está formado por un tubo aislante con dos anillos (electrodos) alrededor, se ensayaron varias configuraciones de anillos y materiales como acero (hierro) y cobre con el fin de analizar y comparar los resultados.



Figura 40. Prototipos para la medición de humedad del suelo con anillos de acero y cobre.
Fuente: Autor.

Luego de tener el circuito y el prototipo construido del sensor de humedad procedemos a realizar las pruebas de medición, para esto es necesario una muestra de suelo, tomamos una muestra parcialmente seca y otra húmeda en un recipiente.

Teniendo los circuitos terminados se inicia con la toma de datos pasando los prototipos diseñados por tres tipos de suelo, suelo seco, parcialmente húmedo y saturado y se continúa con el análisis e interpretación de los resultados.

Para la primera muestra se inserta el sensor en suelo seco y se hace la respectiva medición con ayuda de un osciloscopio.

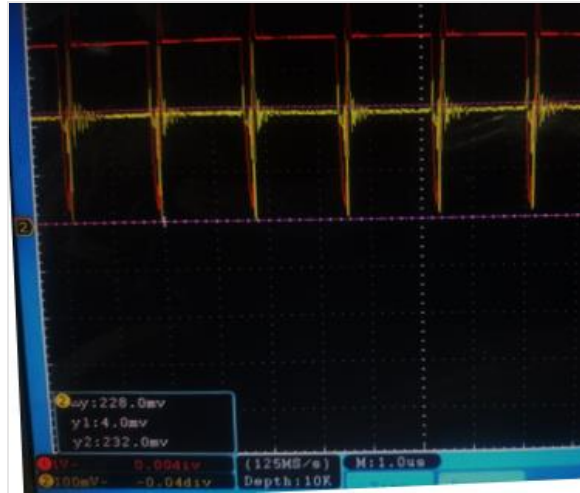


Figura 41. Salidas de los circuitos LM55 (roja) y LM2907 (amarilla) con el sensor en suelo seco.

Fuente: Autor.

La señal de salida del conversor obtenida no es completamente continua, presenta grandes picos de voltaje con una amplitud media de aproximadamente 248mV.



Figura 42. Salidas de los circuitos LM55 (roja) y LM2907 (amarilla) con el sensor en suelo parcialmente húmedo.

Fuente: Autor.

Se le agrega al sensor un pequeño contenido de agua con el fin de notar variaciones en las señales de salida. Luego de esperar algunos minutos la señal se estabiliza, la medición efectuada arroja unos datos similares a los anteriores, los picos y la amplitud de voltaje se mantienen.



Figura 43. Salidas de los circuitos LM55 (roja) y LM2907 (amarilla) con el sensor en suelo saturado.
Fuente: Autor.

En la tercera prueba se agrega agua hasta saturar el suelo, es decir que este deja de absorber el agua, dejamos para unos minutos hasta que los datos obtenidos se estabilicen y hacemos la medición. La respuesta de la señal de salida no varía con respecto a las anteriores, por tanto el circuito empleado en esta primera fase de pruebas se descarta y se continúa con la búsqueda de información para el diseño del sensor.

Entre los inconvenientes presentados, cabe destacar la influencia de cualquier material con el prototipo empleado, debido a la alta sensibilidad que muestra ante cualquier presencia que entre en contacto con el sensor, la variaciones dependen del tipo de material con el que se encuentre y se mantiene constante, como la sonda del osciloscopio que generan cambios en la capacitancia del sensor y por tanto en la medición efectuada, al modificar la distancia de separación de los anillos no hay cambio en la señal de salida del circuito.

Posteriormente se encontró que el LM555 funciona a una frecuencia máxima de aproximadamente 300KHz y el sensor tiene una capacitancia que fluctúa entre los 40 pF y 50 pF, lo cual no sirve para la medición de este rango de capacitancia.

Luego de seguir con la investigación acerca de sensores de humedad tipo sonda (principio capacitivo), se halló documentación acerca del diseño del sensor y el circuito empleado para su medición, en la cual se emplean circuitos resonantes RLC alimentado por un generador de señales y sensores con electrodos de cobre, en base a estos diseños, se realiza la construcción del sensor tipo sonda para la medición de la humedad.

6. DISEÑO DEL SENSOR DE HUMEDAD TIPO SONDA

En este capítulo se describen los aspectos más relevantes del proceso de diseño del sensor fabricado, teniendo en cuenta algunos sensores comerciales profundizados anteriormente como lo son el EnviroScan y el Diviner 2000.

Se discutirá acerca de las generalidades del diseño y sobre consideraciones previas a tener en cuenta.

6.1. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

El sensor a construir para la medida de la humedad del suelo en diferentes profundidades, está basado en la variación de la constante dieléctrica del suelo, el sensor será diseñado a partir de dos electrodos.

Para esto se tiene que aislar la parte conductiva de la tierra, buscando que no haya diferencia de potencial en continua en la tierra, se destacan dos métodos aislantes, el electrónico y el físico.

La aislación física consiste en se separan las puntas de tal manera que no haya conductividad en la tierra usando un aislante o un cable con cobertura como el cable coaxial el cual es usado para transportar señales eléctricas de alta frecuencia con dos conductores concéntricos, uno central (núcleo) encargado de transportar la información y uno exterior de aspecto tubular llamado malla, blindaje o trenza, que sirve como referencia de tierra y retorno de las corrientes, entre ambos se encuentra una capa aislante llamada dieléctrico normalmente de plástica o de PVC (poli cloruro de vinilo) [29].

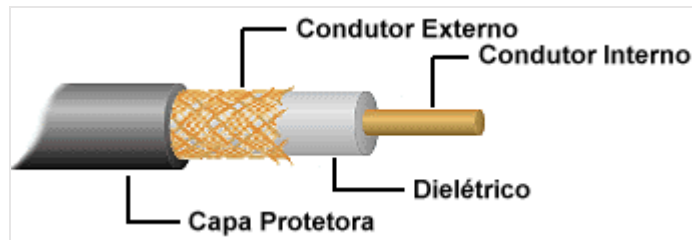


Figura 44. Partes del cable coaxial.
Fuente: Autor.

En general los cables coaxiales más utilizados para el cableado en la industria de la seguridad electrónica y comunicaciones son los siguientes:



Figura 45. RG 59 U/PP con cobertura de malla al 90%, 75Ohm.
Fuente: Autor.

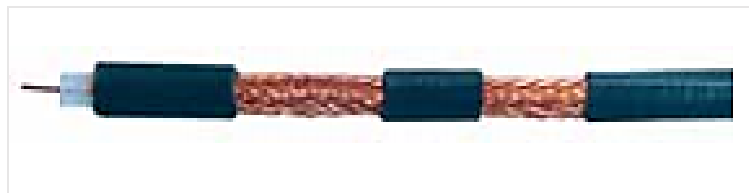


Figura 46. RG 59 DM (doble malla), con cobertura de malla del 67% al 90%, 75 Ohm.
Fuente: Autor.



Figura 47. RG 59 U y bipolar de 2x0.50 mm, con cobertura de malla al 90% con el bipolar integrado al coaxial para conducir energía de 12 a 24 voltios, 75 Ohm.
Fuente: Autor.



Figura 48. RG 58 con conductor multifilar.
Fuente: Autor.



Figura 49. RG 58 FOAM, con conductor de cobre macizo y dieléctrico de polietileno expandido por el método de inyección gaseosa, 50 Ohm.
Fuente: Autor.



Figura 50. RG 213 FOAM, con conductor central de cobre macizo y dieléctrico de polietileno expandido por inyección gaseosa.
Fuente: Autor.



Figura 51. RG 174 A/U con cobertura de malla, 50 Ohm.
Fuente: Autor.

La aislación electrónica consiste en colocar capacitores de desacople entre el circuito y una de las puntas del sensor capacitivo, con esto se elimina el camino resistivo a frecuencia 0 del suelo.

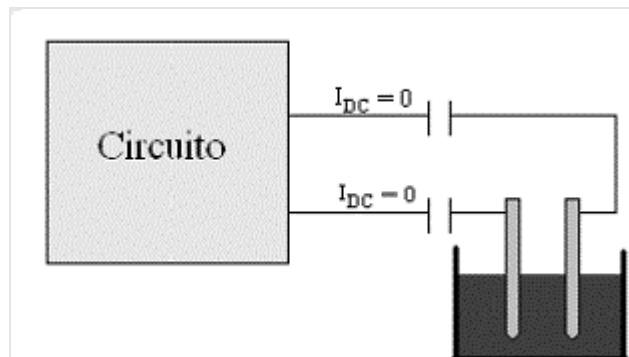


Figura 52. Aislación electrónica.
Fuente: Autor.

Implementando las aislaciones antes mencionadas, y con solo las pérdidas dieléctricas, podríamos considerar a la tierra, modelada como un capacitor. En resumen, el diseño electrónico consiste en realizar un capacímetro.

La forma en la cual queremos determinar la capacidad. Tenemos que recurrir a un procedimiento que se base en frecuencias altas, para hacer la medida menos dependiente de características peculiares del suelo.

6.2. GENERALIDADES DE DISEÑO

Basados en los diseños estudiados, se presenta el diseño del sensor de humedad tipo sonda construido a partir de electrodos de cobre y tubos PVC de acceso para su instalación.



Figura 53. Diseño final del sensor de humedad tipo sonda (izquierda) y tubo PVC de acceso (derecha).

Fuente: Autor.

El sensor está conformado por dos electrodos con forma cilíndrica hueca cuyo material es de cobre y tienen unas medidas de 2 cm de longitud y 2,4 cm de diámetro (medida de un tubo de 3/4"), cada sensor posee dos electrodos separados por una distancia de 0,5 cm.

Los electrodos son fijados alrededor de un tubo de PVC de 1/2" (2.1 cm) de diámetro con una longitud de 25 cm y tapones lisos de 1/2", para fijar dentro de otro tubo de PVC de 1" y longitud de 30 cm. En el tubo de PVC de 1/2" se ubican dos sensores (4 electrodos), dos electrodos arriba y dos abajo separados a una distancia de 10 cm.

Los electrodos cuentan con cable coaxial RG 58 para la transmisión de la información, con el fin de disminuir la sensibilidad del sensor al entrar los cables en contacto físico con otro medio.

El tubo de acceso está hecho de PVC rígido con una pared delgada de 2 mm y dentro un diámetro de aproximadamente de 1". En la mayoría de los suelos que se

instalan se usa el kit de instalación del fabricante. El kit de instalación consta de un trípode con un tubo guía para mantener el tubo de acceso vertical durante la instalación, clavos de acero para mantener el trípode asegurado a la superficie de la tierra, un tornillo sin fin, una cabeza de accionamiento que se coloca sobre el extremo superior del tubo de acceso y protege el plástico, un martillo.

En suelos que son libres de gravilla, de piedras y otros materiales duros, el kit de instalación de los tubos de acceso basta para obtener un ajuste perfecto del tubo en el agujero, lo cual es esencial para que ningún espacio de aire tenga una fuerte influencia sobre las medidas. En suelos secos un espacio de aire o vacío causará lecturas menores a las reales y en suelos que acaban de ser humedecidos el mismo vacío se puede llenar con agua, causando que las lecturas sean mayores a las reales.

En el caso de elementos capacitivos que se componen de dos electrodos cilíndricos, uno encima de otro, el suelo puede ser sólo una pequeña parte del medio dieléctrico del elemento, en este caso, el suelo es afectado por sólo una parte del campo electromagnético entre las placas y este es llamado campo marginal.

En el diseño de estos sistemas se usa un capacitor que consta de dos electrodos cilíndricos, apilados uno encima del otro introducido en un tubo de acceso plástico o podría ser enterrado directamente en el suelo. La capacitancia del sistema de tubo de acceso del suelo está dada por:

$$C_2 = g \epsilon \alpha \quad [\text{Eq.1}]$$

Donde $\epsilon \alpha$ es la permitividad aparente del sistema y g tiene como unidad los faradios y su valor depende de la geometría del sistema. La frecuencia de resonancia ω_r (Hz) es:

$$\omega_r = [2\pi(L)^{0.5}]^{-1} (C_2^{-1} + C_b^{-1} + C_c^{-1})^{0.5} \quad [\text{Eq. 2}]$$

Donde C_b y C_c son los electrodos, son las capacitancias de los electrodos incluidas en la capacitancia de los elementos del circuito interno, al cual se conectan los electrodos, C_2 es la capacitancia del sistema del tubo de acceso en el suelo definida en la [Eq. 1] y L es la inductancia en henrios de la bobina en el circuito LC.

La región de influencia está restringida a una forma de disco relativamente estrecha que rodea la sonda y se concentra en el espacio que hay entre los electrodos. La sonda es más sensible en la región adyacente a este espacio. Esto

significa que la sonda es más sensible en cualquier espacio que exista entre el tubo de acceso, el suelo y esta misma.

Típicamente, el volumen detectado por los sistemas de capacitancia usados en tubos de acceso es relativamente pequeño comparado con el volumen detectado por el NMM (Neutron Moisture Meter) el cual es un sistema que dispara neutrones los cuales son reflejados de vuelta con menor velocidad para detectar volumen y hacer mediciones del suelo.

Para muchos sistemas de capacitancia el volumen detectado es pequeño, puede ser menor que el volumen elemental representativo de la humedad del suelo. Sin embargo las medidas de la dimensión del volumen detectado son más pequeñas que los indicados por el fabricante y el efecto del aire entre las sondas capacitivas y el suelo es grande, causando decrecimiento en la permitividad detectada de aproximadamente 28% para una sonda capacitiva [30].

Para acomodar esto, el fabricante sugiere el uso de una frecuencia escalizada (F_s):

$$F_s = \frac{F_a - F}{F_a - F_w} \quad [\text{Eq. 3}]$$

Donde F es la frecuencia leída con el sensor en el tubo de acceso en el suelo, F_a y F_w son las frecuencias leídas con el sensor que corresponden a cuando está rodeado de aire (F_a) y de agua (F_w), se utiliza F en lugar de ω_r . La salida del sensor normalmente está dada en unidades de m^3 de contenido de agua o el voltaje del sensor puede ser guardado.

En algunos de estos sistemas, la frecuencia del oscilador puede exceder los 100 MHz cuando el tubo de acceso con el sensor dentro está rodeado por aire. La frecuencia podría ser menor si el sistema (sensor, tubo de acceso) está rodeada por agua. Las mediciones con el sensor EnviroSCAN están en un rango de frecuencias de 48 MHz rodeado de agua des ionizada hasta 75 MHz con el sensor rodeado por aire. Con el Diviner 2000 hay frecuencias de 240 MHz hasta 330MHz [31].

Para el funcionamiento del sensor se emplea un circuito RLC con elementos capacitivos en paralelo, un capacitor conocido y el sensor que consiste en dos metales cilíndricos huecos.

Un oscilador típico emplea un circuito RLC con elementos capacitivos en paralelo (Figura 54). La capacitancia C es un valor ya conocido y C_2 está formado por dos electrodos (placas, varillas, cilindros) de la sonda y por parte del mismo suelo, el cual actúa como parte del dieléctrico para C_2 . El grado en el que el suelo actúa como parte del medio dieléctrico para C_2 es determinado por el diseño de la

sonda. Si el elemento de la sonda capacitiva consta de dos o tres varillas insertadas en el suelo, entonces el suelo es una gran parte del medio dieléctrico para el elemento [32].

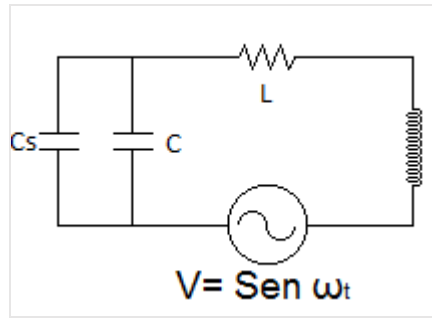


Figura 54. Esquemático de un circuito oscilador RLC acoplado a un elemento capacitivo (C_s), en contacto con el suelo.
Fuente: Autor.

7. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO

A continuación se explicará el desarrollo e implementación del sistema de monitoreo, el cual está compuesto por un sistema embebido para el monitoreo, control y transmisión de variables (microcontrolador Arduino UNO), un módulo Bluetooth HC-05 para la recepción y transmisión de información a dispositivos móviles, un módulo GPRS (General Packet Radio Service) para el envío de mensajes de texto (SMS) con los datos de los sensores y un sistema de alimentación autónomo basado en un cargador y un panel solar (Solar Charger Shield).

7.1. MÓDULO BLUETOOTH HC-05

Los módulos Bluetooth son muy populares para el desarrollo de aplicaciones de monitoreo con microcontroladores, son dispositivos relativamente económicos y de fácil acople con cualquier circuito, el módulo Bluetooth HC-05 es uno de los que ofrece una mejor relación de precio y características, ya que es un módulo Maestro-Esclavo, quiere decir que además de recibir conexiones desde una PC o Tablet, también es capaz de generar conexiones hacia otros dispositivos Bluetooth. Esto nos permite por ejemplo, conectar dos módulos de Bluetooth y formar una conexión punto a punto para transmitir datos entre dos microcontroladores o dispositivos.



Figura 55. Módulo Bluetooth HC-05.
Fuente: Autor.

El HC-05 tiene un modo de comandos AT que debe activarse mediante un estado alto en el pin 34 mientras se enciende (o se resetea) el módulo. En las versiones para protoboard este pin viene marcado como “Key”. Una vez que estamos en el modo de comandos AT, podemos configurar el módulo Bluetooth y cambiar parámetros como el nombre del dispositivo, password, modo maestro/esclavo, etc.

7.1.1.

C

onfiguración de módulo Bluetooth HC-05 mediante comandos AT

Como podemos observar, el módulos **HC-05 es** bastante sencillos de configurar para usarse con el microcontrolador de nuestra preferencia, es muy útil y económico para conectar nuestros dispositivos con microcontroladores a la PC, Tablet, celulares, etc. El HC-05 por otra parte, nos permite hacer algunas cosas que su hermano menor no permite, como enlaces punto a punto entre dos módulos y también teniendo un juego de comandos de configuración más completo.

Para comunicarnos con el módulo y configurarlo, es necesario tener acceso al módulo mediante una interfaz serial, para esto se genera un código de acondicionamiento para iniciar y configurar el Bluetooth a través de comandos AT.

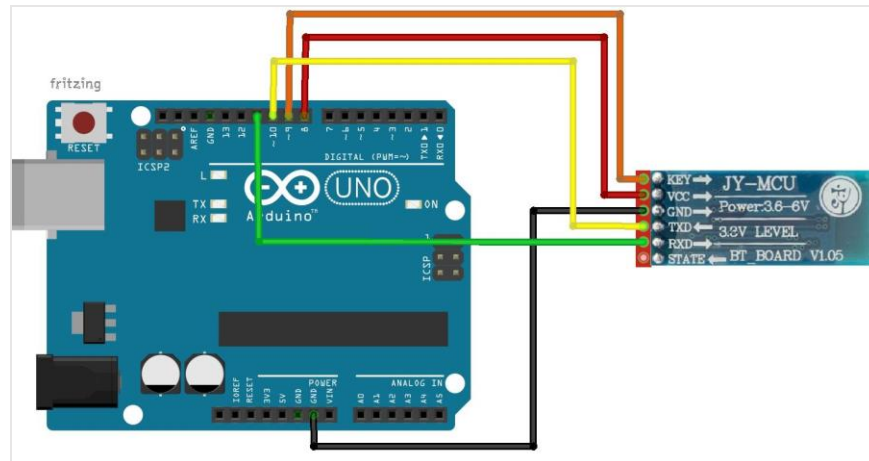


Figura 56. Conexión módulo Bluetooth con Arduino UNO.
Fuente: Autor.

Luego de conetar el módulo Bluetooth con el Arduino UNO, generamos el código para la configuración por comandos AT.

```

buetoothNOO
#include <SoftwareSerial.h>

SoftwareSerial Bluetooth(10, 11); // RX | TX
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Esperando comandos AT:");
  Bluetooth.begin(38400);
}

void loop()
{
  if (Bluetooth.available())
    Serial.write(Bluetooth.read());
  if (Serial.available())
    Bluetooth.write(Serial.read());
}

Subido

Global variables use 337 bytes (16%) of dynamic memory, leaving 1.711
bytes for local variables. Maximum is 2.048 bytes.

6 Arduino/Genuino Uno on COM4

```

Figura 57. Configuración Para iniciar el Bluetooth por medio de comandos AT.
Fuente: Autor.

Los baudios a los que trabaja el puerto serial del Arduino son de 9600 baudios (Serial.begin(9600)) y los baudios a los que trabaja el Bluetooth son de 38400 baudios (Bluetooth.begin(38400)), luego abrimos el hiperterminal del Arduino UNO para visualizar la comunicación serial con el computador.

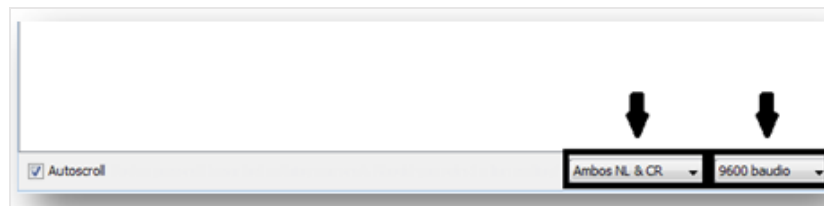


Figura 58. Hiperterminal de Arduino UNO.
Fuente: Autor.

Escribimos la palabra “AT” en el hiperterminal, a lo cual el Bluetooth debe responder con un “Ok”, esto quiere decir que la comunicación con el Bluetooth ha sido establecida y está en funcionamiento.

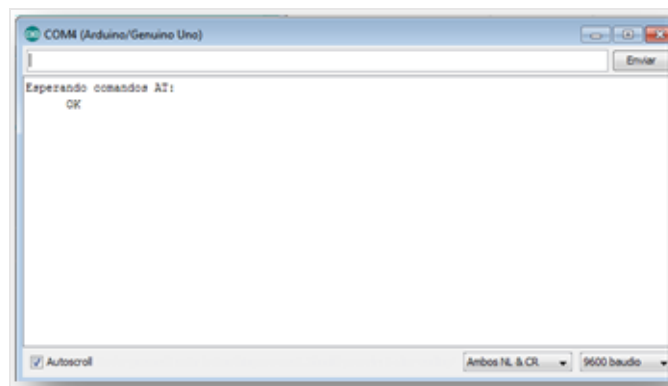


Figura 59. Respuesta del Bluetooth.
Fuente: Autor.

El Bluetooth ya está listo para usarse, ahora se procede con la comunicación Bluetooth con dispositivo móvil.

Otros comandos de configuración son:

Prueba de funcionamiento:

- Enviar: AT.
- Recibe: OK.

Configurar el Baudrate:

- Enviar: AT+BAUD<Numero>
El parámetro número es un carácter hexadecimal de '1' a 'c' que corresponden a los siguientes Baud Rates: 1=1200, 2=2400, 3=4800, 4=9600, 5=19200, 6=38400, 7=57600, 8=115200, 9=230400, A=460800, B=921600, C=1382400.
- Recibe: OK<baudrate>

Configurar el Nombre de dispositivo Bluetooth:

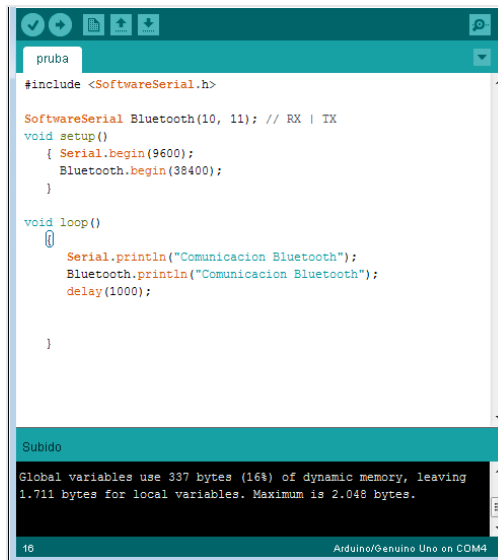
- Enviar: AT+NAME<Nombre>
- Recibe: OK<setname>

Configurar el código PIN de emparejamiento:

- Enviar: AT+PIN<pin de 4 dígitos>
- Recibe: OK<pin de 4 dígitos>

Obtener la versión del firmware:

- Enviar: AT+VERSION
- Recibe: Linvor1.8



```
pruba
#include <SoftwareSerial.h>

SoftwareSerial Bluetooth(10, 11); // RX | TX

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Bluetooth.begin(38400);
}

void loop()
{
  Serial.println("Comunicacion Bluetooth");
  Bluetooth.println("Comunicacion Bluetooth");
  delay(1000);
}

Subido
Global variables use 337 bytes (16%) of dynamic memory, leaving
1.711 bytes for local variables. Maximum is 2.048 bytes.
16 Arduino/Genuino Uno on COM4
```

Figura 60. Código fuente para la transmisión de mensajes (datos) vía Bluetooth.
Fuente: Autor.

Para comprobar la transmisión de datos en el dispositivo móvil se hace uso de una aplicación de la tienda Play Store de Android llamada Terminal BT.



Figura 61. Recepción de datos del Bluetooth a través de dispositivo móvil.
Fuente: Autor.

7.1.2. Creación de la aplicación para el monitoreo de datos con Processing

Processing es un lenguaje de programación y entorno de desarrollo integrado de código abierto basado en Java, de fácil uso y que sirve como medio para la enseñanza y producción de proyectos multimedia e interactivos con diseño digital, que además contiene una herramienta para desarrollar aplicaciones con extensión .apk para Android.

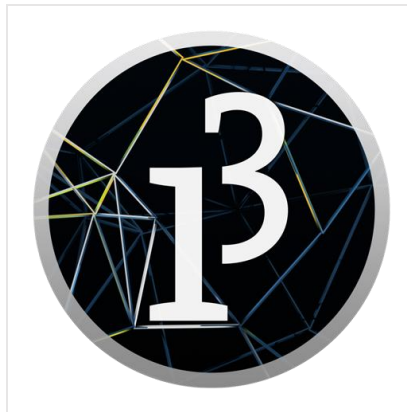


Figura 62. Software Processing para el desarrollo de la aplicación Bluetooth.
Fuente: Autor.

El software Processing cuenta con la librería Ketai Library [33] para el desarrollo de aplicaciones para dispositivos móviles que facilita el uso de sensores, cámara, redes de trabajo (internet), con el fácil acceso a la manipulación de detección de rostros, WiFi Direct, comunicación de campo cercano (Bluetooth), entre otros, hacen del software un programa más completo.

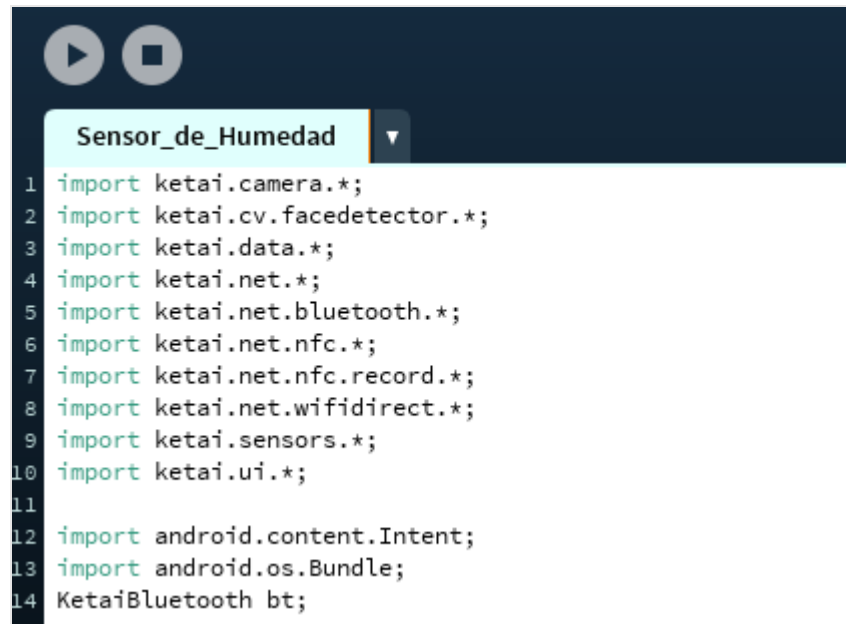


Figura 63. Importación de la librería Ketai (Ketai Library).

Fuente: Autor.

La configuración para la activación del y recepción de datos Bluetooth se realiza mediante funciones de la librería, se declara el Bluetooth (`bt=new KetaiBluetooth(this)`) y se evalúa el estado de actividad del Bluetooth. Por medio de la función `OnBluetoothDataEvent()`, se reciben los datos enviados al Bluetooth, estos datos son de tipo byte (entre -127 y 128) para lo cual es necesario hacer la conversión de byte a flotante para tener un mejor control de los datos.

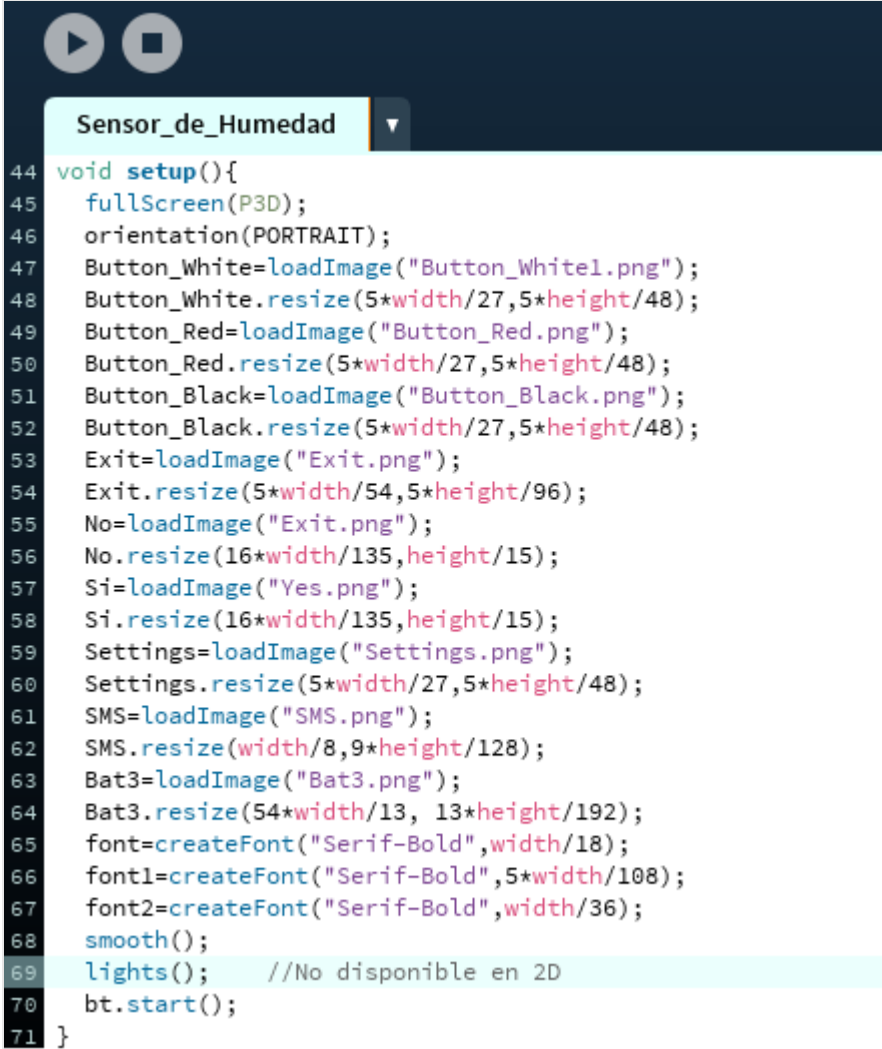
La función `OnDestroy()`, se usa para desactivar el Bluetooth una vez cerrada la aplicación.



Figura 64. Configuración para la activación de Bluetooth y recepción de datos.

Fuente: Autor.

En la función principal configuramos las acciones que son ejecutadas por el programa una vez, como tamaño y dimensiones de la pantalla a través de la función `fullScreen(P3D)`, la carga de imágenes y asignación de tamaño, selección y tamaño de la fuente e inicio del Bluetooth.



```
44 void setup(){
45   fullScreen(P3D);
46   orientation(PORTRAIT);
47   Button_White=loadImage("Button_White1.png");
48   Button_White.resize(5*width/27,5*height/48);
49   Button_Red=loadImage("Button_Red.png");
50   Button_Red.resize(5*width/27,5*height/48);
51   Button_Black=loadImage("Button_Black.png");
52   Button_Black.resize(5*width/27,5*height/48);
53   Exit=loadImage("Exit.png");
54   Exit.resize(5*width/54,5*height/96);
55   No=loadImage("Exit.png");
56   No.resize(16*width/135,height/15);
57   Si=loadImage("Yes.png");
58   Si.resize(16*width/135,height/15);
59   Settings=loadImage("Settings.png");
60   Settings.resize(5*width/27,5*height/48);
61   SMS=loadImage("SMS.png");
62   SMS.resize(width/8,9*height/128);
63   Bat3=loadImage("Bat3.png");
64   Bat3.resize(54*width/13, 13*height/192);
65   font=createFont("Serif-Bold",width/18);
66   font1=createFont("Serif-Bold",5*width/108);
67   font2=createFont("Serif-Bold",width/36);
68   smooth();
69   lights(); //No disponible en 2D
70   bt.start();
71 }
```

Figura 65. Función principal para la visualización de la aplicación.
Fuente: Autor.

En Processing se pueden crear funciones que luego son invocadas en la función principal `void draw()`, para organizar tener una mejor organización.

```

75 void draw(){
76   background(#C1BFBF);
77   Sensores();
78   Texto();
79   Barras();
80   Botones();
81   Bateria();
82   Bluetooth();
83   Confirmar_SMS();
84 }

```

Figura 66. Función principal del programa.
Fuente: Autor.

Para realizar la conexión dispositivo móvil con el Bluetooth se asigna el objeto Bluetooth creado anteriormente y la dirección física del módulo Bluetooth que permite acceder de forma directa y activar la recepción y transmisión de datos, la transmisión de datos se realiza llamando la función `bt.broadcast()` asignando un parámetro de tipo byte al cual se le debe hacer la respectiva conversión en el microcontrolador.

```

151 bt.connectDevice("98:D3:31:90:36:94"); //Conectar por dirección mac
152 tint(0,255,0);
153 textFont(font1);
154 image(Button_Red, 25*width/36, 5*height/48); //Botón On Verde
155 textAlign(CENTER, CENTER);
156 //sensor_up=sensor_up*ecuación-----
157 text(""+sensor_up, 85*width/108, 65*height/128);
158 //sensor_down=sensor_down*ecuación-----
159 text(""+sensor_down, 85*width/108, 55*height/64);
160
161 text(""+battery, 85*width/108, 65*height/192);
162

```

Figura 67. Asignación de dirección física (MAC) para la conexión Bluetooth - móvil.
Fuente: Autor.

Luego de tener configurado y haber establecido la comunicación entre el módulo Bluetooth y el móvil continuamos con el desarrollo de la interfaz para la visualización de la aplicación, esta parte es programada en base al tamaño de la pantalla para garantizar la adaptación de la interfaz a cualquier móvil, para esto se usan las variables “width” y “height” (ancho y largo del display).

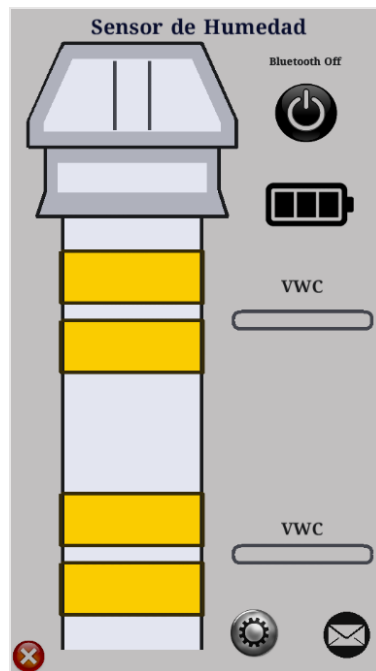


Figura 68. Interfaz para el monitoreo de variables.
Fuente: Autor.

En la Figura 68 se muestra el diseño final de la interfaz para el monitoreo del sensor de humedad.

7.2. COMUNICACIÓN MEDIANTE GPRS SHIELD (ARDUINO):

A continuación se describe el procedimiento para la configuración, control y programación de GPRS, se realizó la programación del GPRS para llamadas de voz y para el envío de mensajes de texto mediante comandos AT.

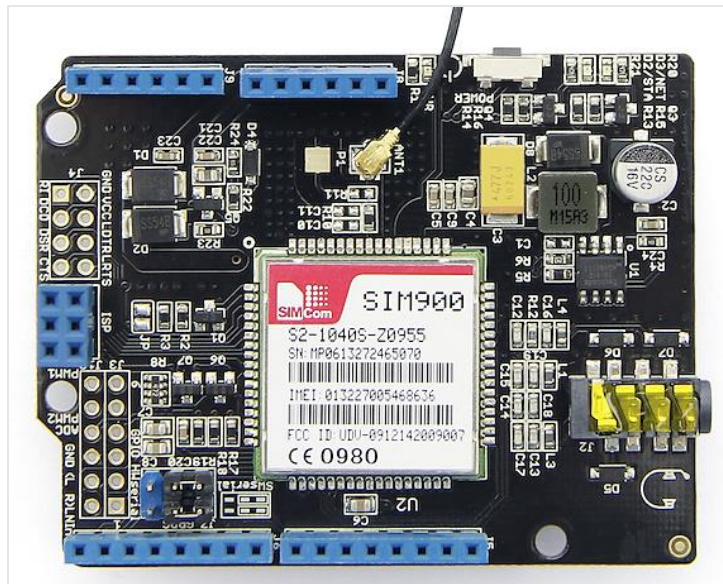


Figura 69. GPRS Shield.

Fuente: Autor.

7.2.1. Configuración del GPRS mediante comandos AT

El GPRS Shield viene configurado por defecto para trabajar a 19200 bps (baud rate), el cual se puede cambiar por medio de comandos AT, con el comando “AT+IPR”, el GPRS responderá ok y luego se envía el valor de baudios que se quiere: 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200. La comunicación serial para la configuración y control del GPRS se realiza creando un objeto de tipo Serial y asignado a este los pines de transmisión y recepción y la velocidad de conexión.

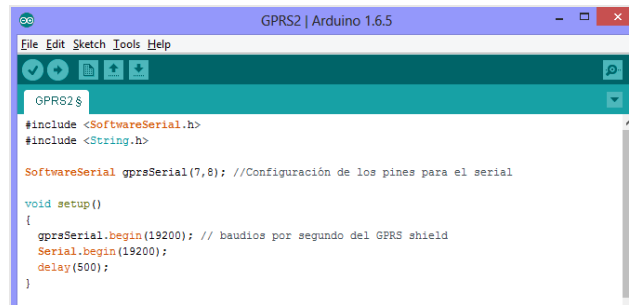


Figura 70. Configuración del puerto serial (Rx-Tx) a 19200 baudios.
Fuente: Autor.

La función SendTextMessage contiene el protocolo para configurar el GPRS a modo envío de mensajes de texto con el comando “AT+CMGF=1” y luego "AT+CMGS=\"+573118115450\"” para establecer el destino del mensaje de texto, en este caso es el número de celular 3118115450 con el código de área +57 para Colombia, posteriormente procedemos a escribir el mensaje que queremos enviar, todo esto a través del puerto serial del GPRS conectado al Arduino; es necesario establecer el código de envío en este caso es ASCII a través de (char)26.

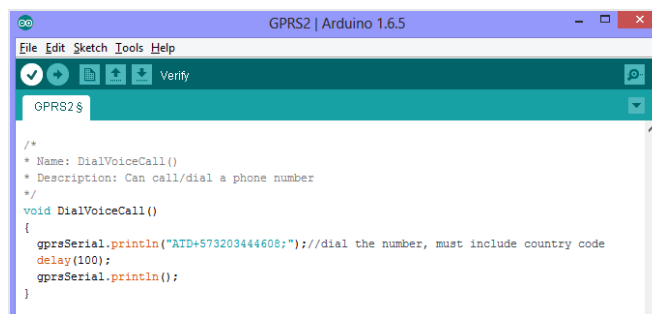


Figura 71. Configuración del GPRS para envío de mensajes de texto.
Fuente: Autor.

La configuración del GPRS para realizar una llamada de voz se hace mediante el comando "ATD+573203444608;" vía serial, donde se escribe el indicador de área +57 y el número de teléfono, todo esto se introduce en una función llamada DialVoiceCall.

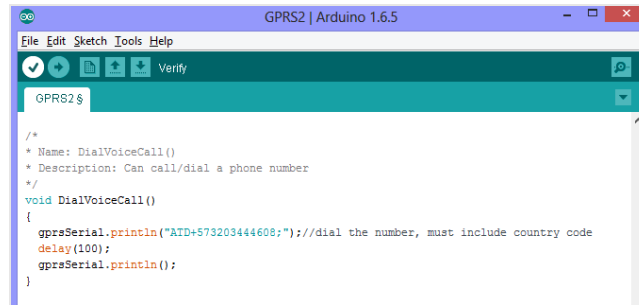


Figura 72. Configuración del GPRS para llamadas de voz.

Fuente: Autor.

Luego de crear las dos funciones para envío de mensajes de texto y llamadas de voz, creamos en el void loop del programa el código para llamar alguna de las dos funciones a través de una tecla, 't' para enviar mensajes de texto y 'd' para llamadas de voz, siempre que el puerto serial del Arduino Uno y del GPRS estén disponibles.



Figura 73. Switch Case para llamar las funciones mediante caracteres.

Fuente: Autor.

7.3. ALIMENTACIÓN MEDIANTE SOLAR CHARGER SHIELD

El Solar Charger Shield es un dispositivo compatible con Arduino de conexión rápida y fácil que permite adaptar una batería y suministrar energía con el fin de cargarla, es posible usar varias baterías con un voltaje entre 2.7V y 4.2V teniendo en cuenta que la salida de voltaje del Solar Charger Shield es de 5V. Otra opción es agregar un panel solar al Shield para formar un dispositivo de carga autónomo y suministrar energía a una batería de iones de litio (Li-ion) la corriente máxima proporcionada por este sistema es de 700mA, un conector USB también es útil para cargar la batería.



Figura 74. Solar Charger Shield (cargador solar) para la alimentación del sistema.

Fuente: Autor.

Características:

- Protección contra corto circuito.
- Indicación del estado de la batería mediante led (Rojo: cargando, Verde: cargado).
- Salida de 5V vía puerto USB para pequeños dispositivos.

Aplicaciones:

- Unidad de sensores inalámbricos.
- Cargador solar.

El Solar Charger Shield genera energía bajo la luz del sol y de las bombillas de filamento, aunque es más eficaz bajo la luz del sol ya que los paneles solares producen corriente por medio de las radiaciones invisibles como la ultravioleta e infrarroja, es necesario tener en cuenta la protección del panel solar contra la

exposición excesiva a los vapores de agua que puede oxidar la superficie del panel solar y reducir su rendimiento y la operación del Solar Charger Shield no debe superar los 5V [34].

Especificaciones:

- Voltaje de operación de 2.7V a 5V, típico 3.7V.

Pin/Header name	Application/Significance
Red LED	Charging status
Green LED	Charging complete
VBAT	Pin to measure the output of the charging circuit to the battery
A0-A6	Analog inputs
BAT and Solar header pins	Used for inserting the battery and the solar panel headers

Figura 75. Especificaciones Solar Charger Shield.
Fuente: Autor.

Los paneles solares son dispositivos que captan la energía de la radiación solar para su aprovechamiento, con una salida de aproximadamente 9V DC.



Figura 76. Panel solar 9V.

Fuente: Autor.

Para empezar con la implementación del sistema de carga autónomo acoplamos el Solar Charger Shield con el Arduino (El Shield tiene unos pines para unir con el Arduino de forma fácil).

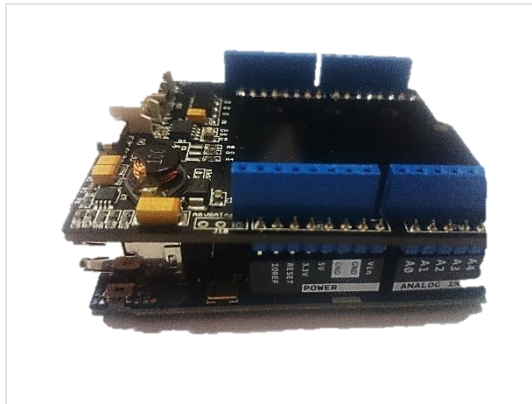


Figura 77. Conexión del Solar Charger Shield con Arduino UNO.

Fuente: Autor.

Posteriormente conectamos el panel solar en las borneras del Shield con el nombre de SOLAR, teniendo en cuenta que la polaridad del panel solar y del Shield sea correcta y en las borneras con el nombre de BATTERY conectamos la batería a cargar (2.7V a 4.2V).

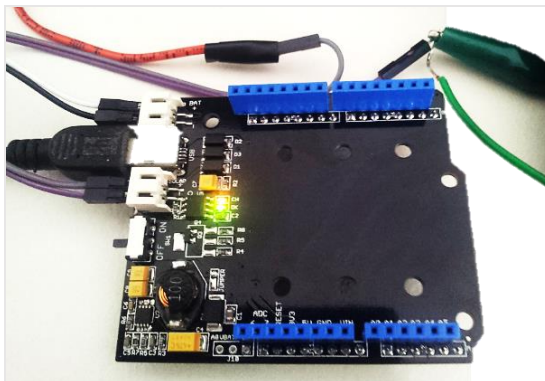


Figura 78. Conexión del Solar Charger Shield con indicadores led (cargando y cargado).
Fuente: Autor.

Los ledes nos indican el estado del Shield, cargando (CH) y cargado (OK).

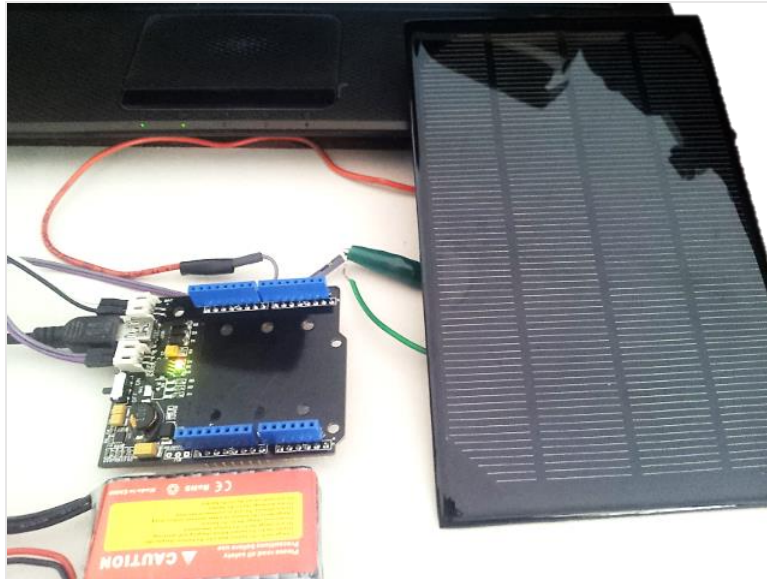


Figura 79. Sistema de carga autónomo con los dispositivos Solar Charger Shield, Arduino UNO, y panel solar de 9V.
Fuente: Autor.

8. FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR TIPO SONDA PARA LA MEDICIÓN DE HUMEDAD

En esta sección se presenta una descripción del funcionamiento del sensor de humedad tipo sonda diseñado, con su respectivo sistema de adquisición, visualización y monitoreo para la medición de humedad del suelo.

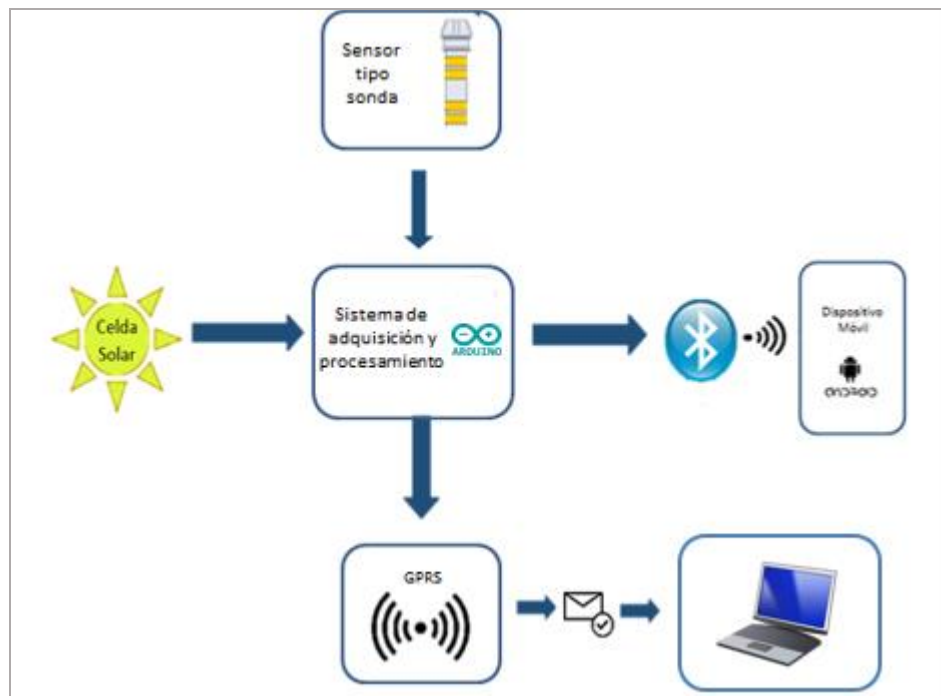


Figura 80. Diagrama de bloques del sistema.
Fuente: Autor.

8.1. SENSOR DE HUMEDAD TIPO SONDA

El sensor de humedad tipo sonda es introducido dentro de un tubo de acceso de PVC que es insertado en el suelo, este funciona a partir de la medición de capacitancia de entre los electrodos que lo conforman, la cual depende del dieléctrico del suelo que varía con el contenido de agua.

Con el sensor dentro del tubo de acceso, las medidas de capacitancia entre los electrodos con el suelo como dieléctrico alrededor del tubo de acceso, donde el

capacitor (electrodos) forma parte del circuito y el voltaje depende de la capacitancia de los electrodos (sensor) la cual a su vez cambia con el medio al que es sometido como aire, agua, suelo seco, suelo húmedo, entre otros.

El dieléctrico del suelo crece conforme aumenta su contenido de agua (humedad) la cual hace que el valor de la capacitancia entre los electrodos sea cada vez mayor.

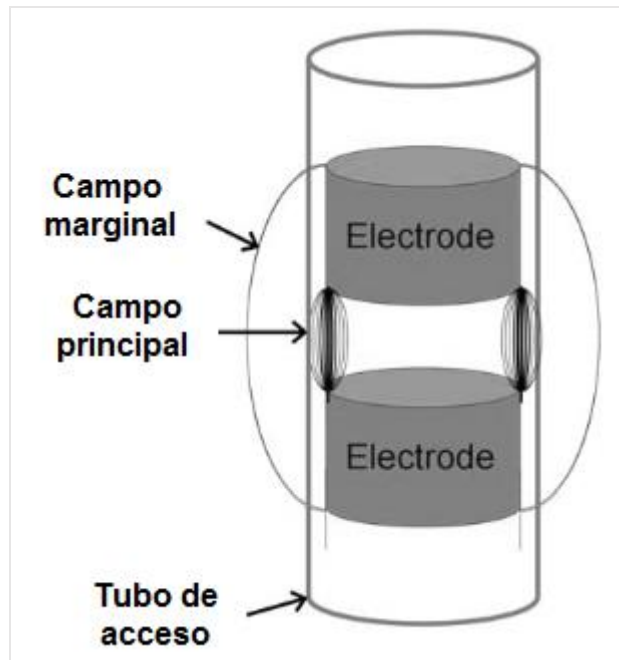


Figura 81. Esquemático de sonda de capacitancia en tubo de acceso, ilustrando los dos electrodos cilíndricos, el campo marginal (fringing field) que entra en el suelo está fuera del tubo de acceso y el campo electromagnético principal que se encuentra directamente entre los dos electrodos.

Fuente: Autor.

Los electrodos son puestos muy cerca de la parte inferior del tubo de acceso, la idea es que el campo marginal del capacitor interactúe con el suelo fuera del tubo de tal manera que la capacitancia estará influenciada por la mayoría de la permitividad eléctrica del suelo y por tanto también por el contenido de agua en el suelo.

Para la instalación del sensor se hace un agujero poco profundo en el suelo, el tubo de acceso es introducido dentro del agujero. En suelos duros es recomendable el uso de perforadoras o trípodes con tubos guía.

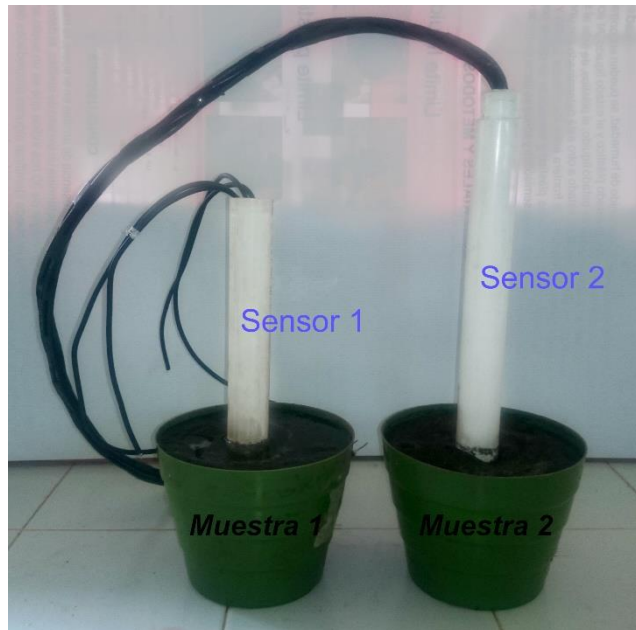


Figura 82. Sensores de humedad tipo sonda introducidos en suelo húmedo.
Fuente: Autor.

8.2. CIRCUITO PARA LA MEDICIÓN DE HUMEDAD EN EL SUELO

Los sensores de capacitancia emplean un circuito electrónico llamado oscilador, el cual produce una onda sinusoidal repetitiva. La propiedad medida es la frecuencia de oscilación, la cual decrece cuando la permitividad del suelo y el contenido de agua incrementan.

El circuito implementado para la medición de humedad del suelo, es un oscilador RLC, con una alimentación a una frecuencia de 100 KHz generada por medio de un temporizador LM555, que proporciona una señal precisa y estable.

La señal de salida en el capacitor (sensor) del circuito RLC varía con respecto al cambio del dieléctrico del suelo (humedad). La señal de salida ingresa al microcontrolador, que se encarga de convertir el voltaje del circuito en datos de humedad.

8.3. INTERFAZ PARA EL MONITOREO DE VARIABLES

Para la visualización de los datos obtenidos en el microcontrolador se ejecuta la aplicación diseñada en el entorno de desarrollo Processing con extensión .apk desde el dispositivo móvil y se acepta la solicitud de encendido Bluetooth para el intercambio de información con el módulo Bluetooth.

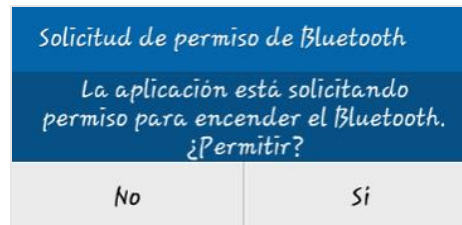


Figura 83. Solicitud de permiso para activar Bluetooth.
Fuente: Autor.

Luego de activar el Bluetooth del dispositivo móvil, se inicia la aplicación y presionando sobre el interruptor de encendido se empiezan a visualizar los datos del sensor.

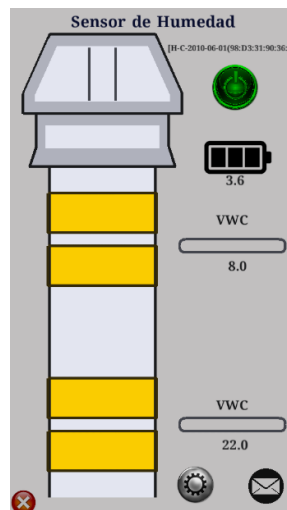


Figura 84. Visualización de la aplicación.
Fuente: Autor.

La aplicación cuenta con la opción de enviar un mensaje con los datos obtenidos a un celular cuyo número ha sido cargado en el microcontrolador, si presionamos la imagen para el envío de la información.

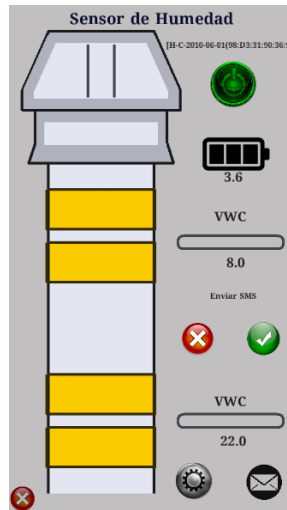


Figura 85. Confirmación para enviar del mensaje de texto.
Fuente: Autor.

Luego aparecerá la confirmación y al aceptar se enviarán los datos obtenidos al número establecido.

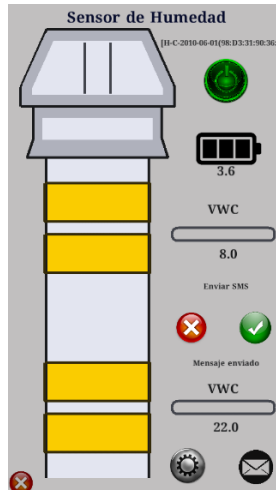


Figura 86. Mensaje de texto enviado.
Fuente: Autor.

Todo este sistema es conectado a la fuente de alimentación principal (batería LiPo) con su respectivo equipo de carga mediante luz solar para garantizar el funcionamiento autónomo del sensor.

9. RESULTADOS

Después de haber implementado los diseños propuestos se logró un sistema que permite:

- Determinar el porcentaje de humedad volumétrica en el suelo.
- Transmitir información vía Bluetooth.
- Visualizar los datos obtenidos en una aplicación para dispositivos móviles.
- El mantenimiento autónomo de la alimentación del sistema.

Para realizar el proceso de caracterización en la medida de humedad se hacen mediciones con el sistema implementado a diferentes porcentajes de humedad y se siguen los pasos descritos en el capítulo 5.

Primero se realizó el proceso de extracción de una muestra de suelo apto para cultivo, se extendió durante 48 horas en un ambiente seco para alcanzar un 0% de humedad.



Figura 87. Apariencia de secado del suelo después de 48 horas.
Fuente: Autor.

Luego de lograr un mínimo porcentaje de humedad, se llenaron y pesaron las materas con el suelo seco.



Figura 88. Llenado y pesado de materas con suelo seco.
Fuente: Autor.

Para determinar la cantidad de agua que se debe agregar al suelo en términos de porcentaje, se realiza la conversión por medio de la fórmula de densidad.

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Donde:

ρ = densidad (cantidad de masa en un determinado volumen).

M= Masa del cuerpo.

V= Volumen que ocupa el cuerpo.

Se aplicó agua destilada con densidad aproximada de 1 gr/cm³, se estableció la relación entre masa (suelo) y volumen (agua), donde por cada Kg de suelo hay 1 L de agua que equivale a un 100% de agua contenida en el suelo, a continuación se muestra el cálculo de la cantidad de agua y su equivalente en porcentaje de humedad, la masa del suelo es de 3422 gr.

Contenido de agua (ml)	Porcentaje de agua (%)
0	0
342,2	10
684,4	20
1026,6	30
1368,8	40
1711	50
2053,2	60
2395,4	70

Tabla 8. Cantidad de agua y porcentaje equivalente, según la masa del suelo.
Fuente: Autor.

Luego de agregar la cantidad de agua correspondiente a cada materia, (cada una de estas contiene un porcentaje de agua calculado) se registraron los datos obtenidos por el sensor en la tabla 9.

Porcentaje de agua (%)	Sensor Inferior (V)	Sensor Superior (V)
0	0,19	0,17
10	0,22	0,19
20	0,21	0,2
30	0,23	0,21
40	0,24	0,21
50	0,24	0,23
60	0,25	0,24

Tabla 9. Respuesta del sensor en función del porcentaje de humedad del suelo.
Fuente: Autor.

Después de haber realizado las mediciones con los dos sensores, se tomaron muestras del suelo con los diferentes porcentajes de humedad y son puestas en un horno a 105°C durante tres días, se sacaron las muestras y se procedió a pesarlas para determinar el porcentaje de humedad gravimétrica del suelo (Hg), que se define como la relación entre la masa del agua y la masa seca de los sólidos del suelo, también se conoce como contenido de agua gravimétrica, el termino masa seca de los sólidos, se refiere al suelo seco en la estufa de 105°C a 110°C, hasta que la masa se hace constante [24] y se calcula mediante la siguiente ecuación [25].

Cálculo de la humedad gravimétrica (Hg):

$$Hg = \frac{Mshc - Mssc}{Mssc - Mc} \times 100\%$$

Donde:

Hg: Porcentaje de humedad gravimétrica del suelo.

Mshc: Masa del suelo húmedo + cápsula.

Mssc: Masa del suelo seco + cápsula.

Cálculo de la humedad volumétrica (Hv):

$$Hv = \frac{pa}{pag} \times Hg$$

Donde:

Hv: Humedad volumétrica.

Hg: Humedad gravimétrica.

pa: Densidad aparente del suelo ($\frac{g}{ml}$).

pag: Densidad del agua ($\frac{g}{ml}$).

Se tomó la densidad del agua *pag* como $1 \frac{g}{ml}$, para que las fluctuaciones de la temperatura de la región no afectaran la densidad del agua.

Para determinar la humedad volumétrica (*Hv*) es necesario saber la densidad aparente del suelo, la cual se halló con las medidas de la cápsula (anillo o cilindro) y la cantidad de suelo contenida en este (masa).

Cálculo de la densidad aparente del suelo:

Masa Anillo (gr)	Masa anillo y suelo (gr)	Masa suelo extraído (gr)	Diámetro del anillo (cm)	Altura del anillo (cm)	Volumen del anillo (cm³)	Densidad aparente del suelo (gr/cm³)
183,06	321,64	45,2	5,6	4,1	100,98	0,925

Tabla 10. Cálculo de la densidad aparente del suelo.

Fuente: Autor.

Cápsula	MC (gr)	MSHC (gr)	MSSC (%)	Hg (%)	Hv (%)
C0	15,87	26,222	25,81	4,14	3,83
C1	7,3	17,34	15,02	30,05	27,79
C2	9,32	24,1	20,18	36,09	33,38
C3	9,39	21,57	18,17	38,72	35,82
C4	9,47	22,18	17,87	51,31	47,461
C5	9,68	26,81	19,92	67,28	62,24
C6	9,89	30,99	21,35	84,12	77,81

Tabla 11. Cálculo de la humedad gravimétrica (*Hg*) y volumétrica (*Hv*) del suelo.

Fuente: Autor.

Luego de haber realizado los respectivos cálculos de humedad gravimétrica y volumétrica, se puede obtener la curva de respuesta del sensor (en Voltios) con respecto al porcentaje de humedad volumétrica del suelo.

Hv (%)	Sensor Inferior (V)	Sensor Superior (V)
3,8	0,19	0,17
27,8	0,22	0,19
33,4	0,21	0,2
35,8	0,23	0,21
47,5	0,24	0,21
62,2	0,24	0,23
77,8	0,25	0,24

Tabla 12. Respuesta de los sensores (V) en relación al porcentaje de humedad volumétrica.
Fuente: Autor.

Para el trabajo experimental se realizaron las pruebas con el sensor diseñado, para determinar la medida de humedad en diferentes profundidades se usaron los dos sensores construidos (4 electrodos), separados por una distancia de 10 cm, obteniendo como resultado la siguiente curva de respuesta del sensor en función del porcentaje de humedad.

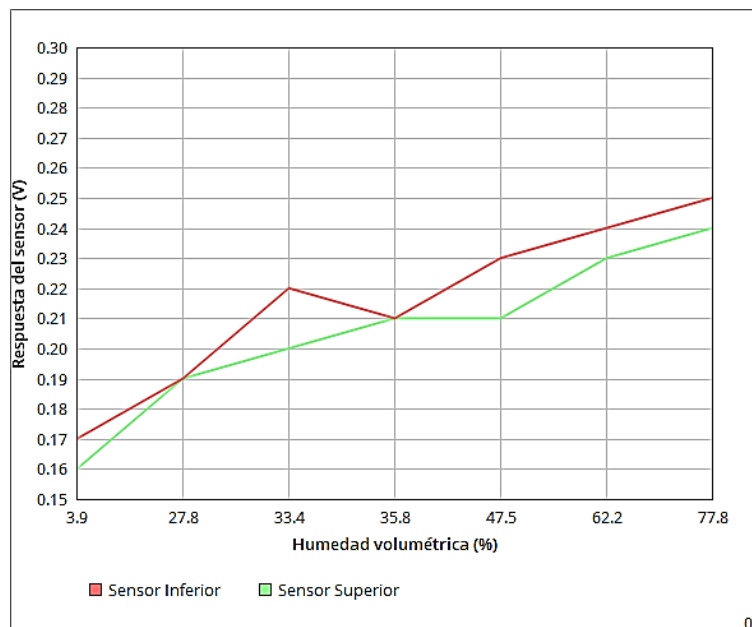


Figura 89. Curva de respuesta de los sensores en función del porcentaje de humedad volumétrica.

Fuente: Autor.

Luego de obtener la curva de respuesta se aplicaron métodos numéricos para hallar la ecuación para la conversión de voltaje a porcentaje de humedad volumétrica.

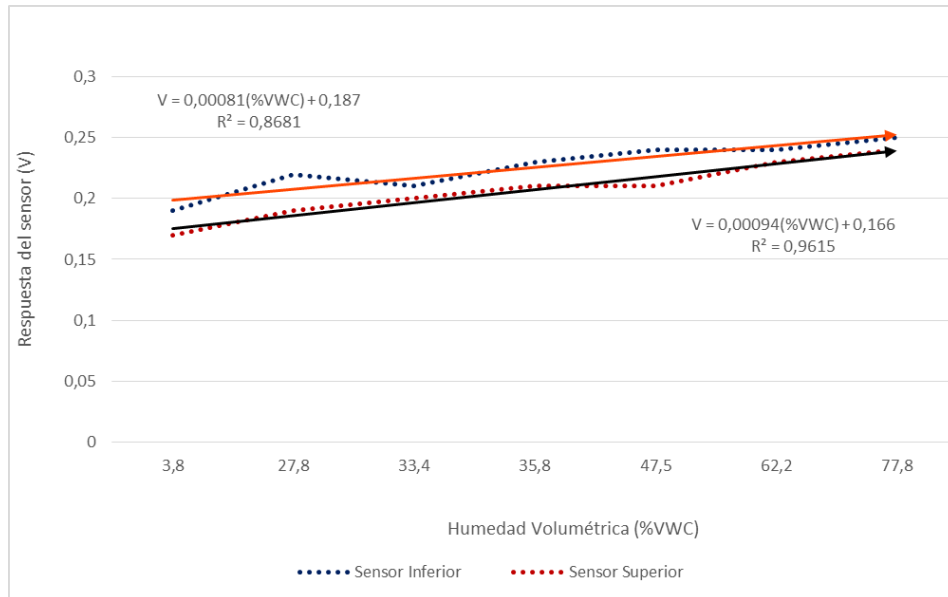


Figura 90. Línea de tendencia y cálculo de la ecuación y el coeficiente de determinación.

Fuente: Autor.

El coeficiente de determinación permite establecer el ajuste o la fiabilidad del modelo de regresión estimado para los datos obtenidos, siempre va a ser menor o igual que uno, sería 1 si el modelo estimado puede explicar completamente la variable dependiente sin ningún error (lo cual es poco probable en la práctica), en este caso tenemos un coeficiente de determinación con valor muy cercano a uno, lo que quiere decir que es un modelo bastante aproximado y por tanto es fiable.

En la medición de humedad, la capacidad de campo del suelo utilizado para la caracterización se encuentra en el 50% de humedad volumétrica, a partir de este valor el suelo entra en un estado de saturación en el que la absorción de agua por el suelo es casi nula.



Figura 91. Elementos necesarios para la caracterización del sensor.
Fuente: Autor.

El procedimiento descrito para la caracterización del sensor de humedad es un acercamiento para el cálculo del porcentaje de humedad gravimétrica del suelo, en el cual la salida de voltaje es proporcional al aumento del contenido de agua y por tanto a la constante dieléctrica del suelo.



Figura 92. Medición de humedad con el sensor y el sistema implementados.
Fuente: Autor.

La variación de capacitancia de los sensores es afectada por el contacto físico externo e interno con otros materiales del sistema, esto se debe a la alta sensibilidad de los sensores, por tanto es recomendable esperar a que se

estabilice la medición de humedad y hacer el menor contacto posible con otros materiales ajenos al sistema.

En cuanto al diseño e implementación del circuito, se generó el PCB creando un plano o malla de masa y pistas cortas y anchas para reducir la sensibilidad y eliminar el ruido eléctrico y la autoinductancia parasita que afecta a los componentes, además se hace uso de la opción.

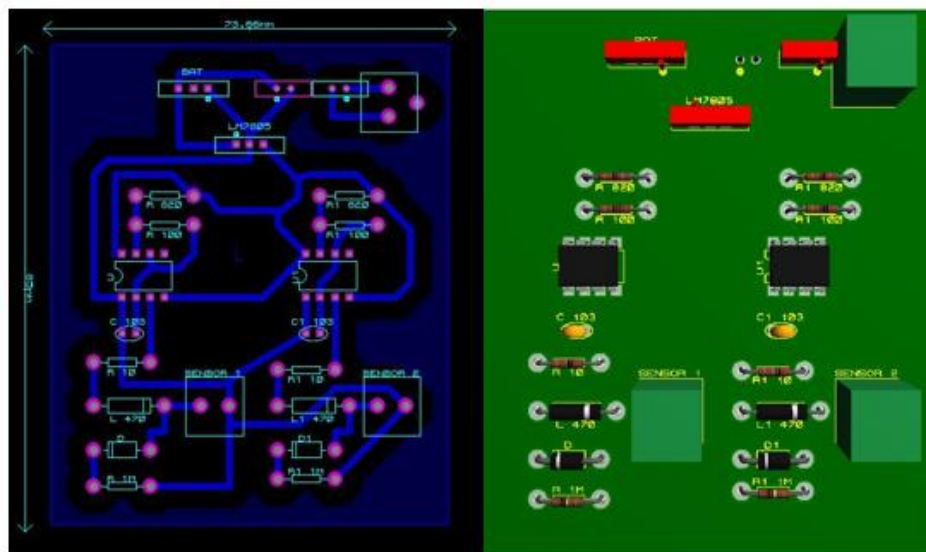


Figura 93. Resultado del circuito PCB y visualización en 3D.

Fuente: Autor.

Finalmente se obtuvo todo el sistema de adquisición, procesamiento, transmisión y recepción de datos con su respectivo circuito y la aplicación para la visualización de información con el sistema de carga para la alimentación autónoma del circuito mediante energía solar.

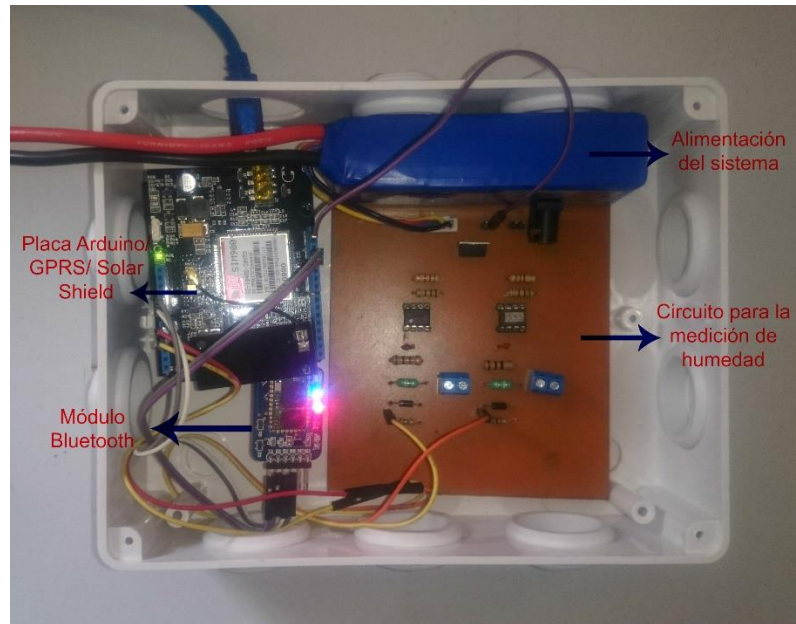


Figura 94. Sistema para la medición de humedad, transmisión y monitoreo de información.
Fuente: Autor.

Una vez implementado todo el sistema para la adquisición y monitoreo de los datos del sensor, se procedió a realizar las pruebas en campo, primero se hizo un agujero en forma cilíndrica con una profundidad de 60 cm para la instalación del sensor de humedad, después de tener todas las conexiones establecidas, se inició con la lectura de los datos obtenidos por el sensor y la visualización de estos por medio de la aplicación desarrollada y los mensajes de texto.



Figura 95. Instalación del sensor de humedad tipo sonda.
Fuente: Autor.



Figura 96. Sistema de adquisición de datos y alimentación mediante panel solar.
Fuente: Autor.

10. DISCUSIÓN

Los resultados de este trabajo indican que los datos del sensor tipo sonda pueden ser usados para hacer estimaciones con precisión de la humedad del suelo. Se comprueba la existencia de una buena correlación entre el voltaje de salida del sensor y la humedad del suelo medida. Los resultados obtenidos por los procedimientos de ajuste de modelos de regresión lineal, muestran una elevada precisión en las predicciones obtenidas en el total del área de estudio, alcanzando valores en los coeficientes de determinación de 0.868 para el sensor superior y de 0.961 para el inferior.

En consecuencia los modelos de regresión lineal calculados en el presente trabajo, son de aplicación al área de estudio, con unos valores de R^2 de 0.868 y 0.961. Estos valores son muy cercanos y si se comparan entre sí, se comprueba que la precisión con que se estima la humedad del suelo es mayor usando el sensor inferior, esto se puede atribuir a que el suelo presenta una mejor distribución uniforme de humedad a esta profundidad.

Existen posibles vías de introducción de errores en el sistema de sensado, que explicarían las diferencias entre las estimaciones y las observaciones. En primer lugar la humedad observada en campo ha sido evaluada con diferentes suelos. En segundo lugar existen capacitancias externas que afectan la medición del sensor. En tercer lugar pueden existir desplazamientos entre las mediciones hechas por el sensor, que aun siendo de poca magnitud provocan una diferencia entre la humedad real y la medida.

La metodología empleada en la que se hace necesaria una transformación lineal, hace posible la medición de la humedad en suelos preferiblemente similares al empleado para la calibración del sensor (suelo apto para cultivo) y el cálculo del intervalo de confianza de las predicciones.

Con la adquisición de los datos del sensor de humedad, se podrá hacer una estimación periódica de la humedad del suelo para evaluar el contenido de agua en un área determinada, con el fin de determinar cuándo se debe regar un cultivo.

En cuanto al sistema de almacenamiento de batería mediante cargador solar, se sometió el panel fotovoltaico a una prueba en un día soleado, teniendo como resultado un voltaje entre 6.8 y 9.5 voltios, con una corriente máxima de 800 mA y un tiempo de carga aproximado de 5 horas, el panel fotovoltaico al ser expuesto a la luz artificial con un bombillo ahorrador de energía de 20 W, arroja un voltaje entre 0.2 y 0.8 voltios con una corriente mínima sin ningún efecto de carga, cabe destacar que las pruebas realizadas con el cargador solar fueron hechas con una

batería de LiPo de 2200 mAh, las cuales no tenían consumo de carga externo y no estaban totalmente descargadas.

El módulo Bluetooth HC-05 usado para la transmisión inalámbrica del valor de humedad del suelo, está configurado a 38400 baudios, que es el número de unidades por segundo transmitidos por un medio digital, que representa una velocidad de transmisión bastante alta para la comunicación entre el sensor y el dispositivo móvil, cuyo valor es visualizado a través de la aplicación desarrollada, el dispositivo Bluetooth usado es de bajo costo y consumo, en las pruebas realizadas proporciona un alcance máximo de transmisión de datos de 10 metros en zonas despejadas, lo cual representa un rango suficiente para la transmisión inalámbrica.

El dispositivo GPRS implementado permitió establecer una comunicación inalámbrica de largo alcance mediante mensajes de texto (SMS), que son enviados a una central en intervalos de tiempo definidos por el usuario con el fin de recolectar la información del sensor y almacenarla, ya sea manualmente o en una base de datos programada, con un valor aproximado de \$137 por mensaje y cuyo alcance es a nivel nacional, dependiendo del operador que se maneje en la tarjeta SIM.

La aplicación desarrollada permitió el monitoreo de datos a corto alcance, los datos transmitidos por el módulo Bluetooth HC-05 son visualizados en un dispositivo móvil, la aplicación es de fácil instalación y uso.

11. CONCLUSIONES

En este proyecto se desarrolló un sistema capaz de medir el porcentaje de humedad del suelo empleando un circuito RLC, para la adquisición y el procesamiento de la información. Se implementó un algoritmo que permite determinar el contenido volumétrico de humedad en suelos basado en el principio de funcionamiento de sensores capacitivos. Se elaboró una interfaz apta para la transmisión y recepción de información entre los dispositivos y módulo conectados, la cual permite tener un fácil acceso a los datos del sistema; los procedimientos y algoritmos desarrollados permitieron:

- Se diseñó y construyó un sensor de humedad tipo sonda para la medición de humedad a diferentes profundidades, basado en circuitos resonantes RLC, aplicando el principio de la variación del dieléctrico en el suelo con el aumento de humedad en este, el cual responde al cambio de humedad en el suelo de forma verificable y medible, de bajo costo en cuanto a las herramientas y materiales usados.
- Un modelado de los sensores para caracterizar la respuesta del circuito y mediciones hechas del sistema en medidas de humedad.
- Se Implementó un sistema inalámbrico para la transmisión y recepción de la información obtenida por el sensor vía Bluetooth.
- Se visualizaron los datos de humedad obtenidos del sensor mediante una aplicación en un dispositivo móvil y el control de un GPRS para enviar la información procesada a través de mensajes de texto.
- Se implementó un dispositivo para garantizar el funcionamiento autónomo de la alimentación del sensor que permite la carga de la fuente (batería LiPo) por medio de celdas solares.

Entre las dificultades que se presentaron en el desarrollo del sistema se encontró que el sensor de humedad tipo sonda es muy sensible al contacto físico y campos electromagnéticos cercanos, los cuales provocan variaciones en la medición del circuito de humedad del suelo.

El trabajo con suelos presenta desafíos en cuanto a la metodología, que se fueron detectando en el avance del proyecto a medida que se adquirían los conocimientos y las herramientas necesarias para resolverlos.

Se realizó un importante análisis del estado del arte de la medida de humedad a partir del valor de la constante dieléctrica, se estudiaron diferentes investigaciones que permitieron separar los trabajos consistentes de los más objetables y se aislaron y detallaron las teorías más aceptadas en la materia.

REFERENCIAS

- [1] C. S. Spain, «Sensores para medidas de humedad en suelos, humectación y flujo de calor,» 2004.
- [2] H. Magán, Sensor de humedad del suelo de bajo coste para Control de Regadíos.
- [3] S. Centro de investigaciones tecnológicas del noroeste, Proyecto SAGARPA-CONACYT.
- [4] C. Guastavino, F. Jorge y I. Schinca, Sensor de Humedad de Suelos, Uruguay, 2009.
- [5] E. Filger y L. Padovani, «SENSOR DE HUMEDAD CONDUCTIVO EN SÓLIDOS CON APLICACIÓN EN INVERNADEROS,» Universidad de Quilmes, Argentina, 2004.
- [6] J. Martínez Fernández y A. Ceballos Barbancho, «Diseño y Validación de una sonda TDR para la Medición de la Humedad del Suelo,» Universidad de Salamanca, España, 2001.
- [7] A. Cama Pinto, F. Gil Montoya, J. Gómez López, A. García Cruz y F. Manzano, «Sistema Inalámbrico de Monitorización para Cultivos en Invernadero,» *DYNA: Facultad de Minas*, vol. 81, nº 184, pp. 164-170, 2014.
- [8] A. Botero y J. Alirio, UTILIZACIÓN DE SENSORES DE HUMEDAD DEL SUELO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS CLIMÁTICOS EN ZONAS DE MONTAÑAS MEDITERRÁNEA, Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [9] M. Rezaei, E. Ebrahimi, S. Naseh y M. Mohajerpour, «A New 1.4Ghz Soil Moisture Sensor,» *Measurement*, vol. 45, nº 7, pp. 1723-1728, 2012.
- [10] D. Jain, «DESING AND DEVELOPMENT OF SOIL MOISTURE SENSOR AND RESPONSE MONITORING SYSTEM,» *Recent International Journal of Research in Science and Technology ISSN*, vol. 3, nº 6, pp. 142-145, 2014.
- [11] N. Jorapur, V. S. Palaparthi, S. Sarik, J. John, M. Shojaei Baghinic y G. Ananthasuresha, «A LOW POWER, LOW COST SOIL MOISTURE SENSOR USING DUAL PROBE HEAT PULSE TECHNIQUE,» *Sensor and Actuators A: Physical*, vol. 233, pp. 108-117, 2015.
- [12] D. M. Faris y M. B. Mahmood, «Data Acquisition of Greenhouse Using Arduino,» *Journal of Babylon University/Pure and Applied Sciences*, nº 7, pp. 1908-1916.
- [13] W. T. Watson, D. Holslin, J. Fred, T. Stokes, G. Vargo y V. Verbinski, «RESULTS OF MODELING AND EXPERIMENTAL MEASUREMENTS FOR THE DESING OF A NEUTRON SURFACE MOISTURE MEASUREMENT SENSOR,» *Nuclear Science, IEEE*, vol. 44, nº 3, pp. 764-768, 1997.

- [14] K. B. Khalid y A. H. Shaari, «Analysis of Multilayered Microstrip and Its Application for Designing Microstrip Moisture Sensor,» de *IEEE International Conference*, 2000.
- [15] Y. YU y L. Weiguang, «Optimum Design of Conducting Sensor for On-line Moisture Measurement,» *Intelligent Control and Automation*, pp. 3757-3760, 2004.
- [16] F. Jafari, K. Khalid, D. M. Yusoff y J. Hassan, «Development and Design of Microstrip Moisture Sensor for Rice Grain,» *RF and Microwave Conference*, pp. 258-261, 2006.
- [17] M. Moghaddam, D. Entekhabi, Y. Goykhman, K. Li, M. Liu, A. Mahajan, A. Nayyar, D. Shuman y D. Teneketzis, «A Wireless Soil Moisture Smart Sensor Web Using Physics-Based Optimal Control: Concept and Initial Demonstrations,» *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal*, vol. 3, nº 4, pp. 522-535, 2010.
- [18] B. Will, M. Gerding, T. Musch y I. Rolfes, «Determination of Soil Moisture Based on an Improved Sensor Design Using Time Domain Transmission Measurements,» *Microwave Conference*, pp. 218-221, 2011.
- [19] R. N. Dean, A. K. Rane, M. E. Baginski, J. Richard, Z. Hartzog y D. J. Elton, «A Capacitive Fringing Field Sensor Design for Moisture Measurement Based on Printed Circuit Board Technology,» *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions*, vol. 61, nº 4, pp. 1105-1112, 2012.
- [20] K. Xu, Q. Sheng, X. Zhang, P. Li y S. Chen, «Design and Calibration of the Unilateral Sensitive Soil Moisture Sensor,» *Sensor Journal, IEEE*, vol. 15, nº 8, pp. 4587-4594, 2015.
- [21] F. J. I. S. Claudia Guastavino, «Proyecto SDHS: Sensor de Humedad de suelos,» 2009.
- [22] M. Á. D. R. O. S. V. H. Magán, «Self Balance Impedance Bridge, un método».
- [23] I. G. A. CODAZZI, «Capacidad de campo,» de *PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS*, Bogotá, 1990, pp. 19-20.
- [24] I. G. A. CODAZZI, «Humedad del suelo,» de *PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS*, Bogotá, 1990, pp. 65-66.
- [25] I. G. A. CODAZZI, «Humedad Gravimétrica,» de *MÉTODOS ANALÍTICOS DEL LABORATORIO DE SUELOS*, p. 376.
- [26] I. G. A. CODAZZI, «Densidad,» de *PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS*, Bogotá, 1990, p. 12.
- [27] I. G. A. CODAZZI, «Densidades,» de *PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS*, Bogotá, 1990, pp. 24-39.

- [28] Vegetronix, «VH400 Soil Moisture Sensor Probes».
- [29] R. d. n. deseguridad, «Elementos de transmisión para la seguridad electrónica,» Argentina.
- [30] G. De Rosny, «Numerical modeling of a capacitance probe response.,» *Soil Science Society of America Journal.*, 2001.
- [31] A. P. G. t. M. I. a. S. T. Field Estimation of Soil Water Content, «INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 2008.».
- [32] S. J. I. W. a. D. R. J. Zegelin, «Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry.,» *Water Resources Research.*, 1989.
- [33] J. D. D. Sauter, «Ketai Library».
- [34] S. Studio, «Solar Charger Shield V2.0b».